

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

## **AUTOREFERÁT K DISERTAČNÍ PRÁCI**

2019

Ing. Ivan Šperlín

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

Studijní obor elektroenergetika

**Regulace napětí a jalového výkonu  
v distribuční soustavě VN**

**Voltage and reactive power regulation  
in the HV distribution system**

## **Abstrakt**

Disertační práce se věnuje možnostem regulace jalového výkonu u zdrojů el. energie provozovaných paralelně s distribuční soustavou na hladině VN v souvislosti s vzrůstajícím množstvím připojovaných disperzních zdrojů a nově definovanými požadavky ENTSO-E, navazujících evropských norem řady TS 50549 a kodexů provozovatelů distribučních soustav na regulaci napětí řízením jalového výkonu v rámci PQ diagramu.

V práci jsou popsány průběhy napětí, činného výkonu a jalového výkonu při provozu větrné elektrárny a kogenerační jednotky provozované paralelně s distribuční soustavou ČEZ Distribuce na hladině VN s předepsaným řízením jalového výkonu na pevnou hodnotu účinníku a řízením jalového výkonu v závislosti na napětí.

Vlastní regulace je realizována změnou hodnoty jalového výkonu v rámci definovaného PQ diagramu v závislosti na skutečné a požadované hodnotě napětí v měřeném bodě soustavy.

Výsledky z měření hodnot U, P, Q hodnotí vliv jalového výkonu napětí v místě připojení výrobní el. energie k síti s ohledem na dodržení napětí v rozsahu provozních mezí.

Na základě výsledků měření a zkušeností s regulací jalového výkonu na uvedených výrobních jsou definována doporučení pro metodiku návrhu a stanovení podmínek pro instalace ASRU v sítích PDS.

## **Klíčová slova**

Energetický zákon, pravidla provozování distribuční soustavy, provozovatel distribuční soustavy, distribuční soustava, výroba, obnovitelné zdroje energie, rozptýlené zdroje, větrná turbína, kogenerační jednotka, synchronní generátor, přebuzený, podbuzený, asynchronní generátor, střídač, regulace napětí, regulace jalového výkonu, napětí, činný výkon, jalový výkon, účinník, PQ diagram.

## **Abstract**

The dissertation thesis deals with the possibilities of control of reactive power with sources of electric power operated parallel to the distribution network on the HV level in relation to an increased quantity of distribution energy resources connected to the distribution network within the context of newly defined requirements ENTSO-E, follow-up European standards TS 50549 and codes of distribution system operators on regulation of voltage through control of the reactive power in terms of PQ diagram.

This thesis describes courses of voltage, active power and reactive power during operation of a wind energy converter and cogeneration units operated in parallel with the ČEZ Distribuce distribution network on medium voltage level with the prescribed control of the reactive power to a fixed value of a power factor and the control of the reactive power depending on voltage.

The actual regulation is realized by the change of reactive power within the defined PQ diagram in dependence on real and required values of voltage in measured point of the network. Not only generators but also other elements in the system node can be connected to the control.

The measurement results of U, P, Q values evaluate an influence of the voltage reactive power in a point of connection of a power generating plant to the grid with regard to keeping the voltage within a range of operating limits.

Based on the measurement results and experience with reactive power control on the plants listed are defined recommendations for the design methodology and the conditions for installation ASRU networks PDS.

## **Key Words**

Energy act, rules for the operation of distribution networks, distribution system operator, distribution network, power plant, renewable resource energy, distributed energy resources, wind turbine, combined heat and power module, synchronous generator, overexcited, underexcited, asynchronous generator, inverter, voltage regulation, reactive power regulation, voltage, active power, reactive power, power factor, PQ diagram.

Obsah	strana
1. Úvod	7
2. Cíle disertační práce	9
3. Legislativa podporující výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie	11
3.1. Vývoj v legislativě podporující OZE	11
3.2. Současná legislativa podporující připojení výroben	11
3.3. Energetický zákon	11
3.4. Vyhláška o připojení	12
3.5. Příloha č. 4. - PPDS	12
4. Nové pokročilé funkce spojené s provozem výroben	12
4.1. Zásady podpory sítě	12
4.2. Řízení jalového výkonu	13
5. Automatická sekundární regulace napětí – ASRU	14
5.1. Regulace napětí jalovým výkonem	14
5.2. Princip ASRU	15
5.3. Realizace regulace napětí a jalového výkonu v distribuční soustavě	15
6. Zdroje činného výkonu a možnost řízení jalového výkonu	16
6.1. Synchronní výrobní moduly	16
6.2. Nesynchronní výrobní moduly a možnost řízení jalového výkonu	16
7. Měření potřebných dat pro vyhodnocení vlivu regulace	17
7.1. Statistická analýza	17
8. Větrná energie a výroba elektřiny z VTE	18
8.1. Aplikace regulace ASRU v lokalitě VTE Kopřivná	18
8.2. Parametry generátoru Enercon	18
8.3. PQ diagram synchronního generátoru VTE	19
8.4. Řízení napětí a jalového výkonu větrné turbíny Enercon	20
8.5. Aplikace ASRU na VTE Kopřivná	21
9. Hodnocení napětí na základě provedených měření provozu VTE	22
9.1. Provoz VTE s $\cos \varphi = \text{konstanta}$	22
9.2. Provoz VTE v režimu regulace $Q = f(U)$	23
9.3. Exploratorní analýza dat provozu VTE	24
9.3.1. Provoz VTE v režimu $\cos \varphi = \text{konstanta}$	24
9.3.2. Provoz VTE v režimu regulace $Q = f(U)$ - ASRU	25
9.3.3. Vyhodnocení statistických charakteristik VTE Kopřivná při provozu $\cos \varphi = \text{konstanta}$ a regulace $Q = f(U)$	26
10. Kogenerační jednotky a výroba elektřiny z KGJ	27
10.1. Princip kogenerace se spalovacím motorem	27
10.2. Aplikace regulace ASRU v lokalitě Moravský Beroun	28
10.3. Parametry synchronního generátoru Marelli	28
10.4. PQ diagram synchronního generátoru KGJ	28
10.5. Řízení napětí a jalového výkonu synchronního generátoru	28
10.6. Aplikace ASRU na KGJ 999 kW Granitol Moravský Beroun	29
11. Hodnocení napětí na základě provedených měření provozu KGJ	30
11.1. Provoz KGJ s $\cos \varphi = \text{konstanta}$	30

11.2.	Provoz KGJ v režimu regulace $Q = f(U)$	30
11.3.	Exploratorní analýza dat provozu KGJ	32
11.3.1.	Provoz KGJ v režimu $\cos \varphi = \text{konstanta}$	32
11.3.2.	Provoz KGJ v režimu regulace $Q = f(U)$ - ASRU	33
11.3.3.	Vyhodnocení statistických charakteristik KGJ Moravský Beroun při provozu $\cos \varphi = \text{konstanta}$ a regulace $Q = f(U)$	34
12.	Výhody regulace napětí ASRU	35
13.	Doporučení pravidel regulace $Q = f(U)$ pro metodické postupy PDS	36
14.	Závěr	37
14.1.	Rekapitulace cílů disertační práce	39
	<b>Literatura</b>	40
	<b>Publikační činnost</b>	43

## 1. Úvod

V České republice, podobně jako v Evropě, vzrostl s uplatňováním legislativy EU ohledně podpory a využití OZE počet a velikost výroben s rozptýlenou výrobou. Tento trend bude pokračovat i v příštích letech. V celoevropském měřítku jsou vyvíjeny projekty pro využití energie větru, slunce a biomasy, které přináší nové požadavky a výzvy PDS z hlediska kvality napětí a rovnováhy mezi spolehlivým provozem a náklady na provoz sítí, které byly původně budovány pro distribuci energie z nadřazené soustavy konečným zákazníkům. Stejně sítě v současné době zajišťují také distribuci z rozptýlené výroby do DS konečným zákazníkům a běžný je i přenos el. energie z DS do nadřazené soustavy.

V souvislosti s penetrací disperzních zdrojů zapojovaných do distribučních soustav vyvstávají z hlediska bezpečného a spolehlivého provozu DS i vlivu na provoz přenosové soustavy nové otázky s připojováním a provozováním výrobních elektrických zařízení. Pravidla pro udržení vysoké úrovně bezpečnosti dodávek energie jsou v rámci Evropy stanovena síťovými kodexy, které sjednocují podmínky jednotlivých členských zemí, stanovují postupy pro všechny zájemce o připojení a zároveň vytvářejí podmínky pro podnikání v energetice. Pokud požadujeme ovlivnit změnu napětí, musíme regulovat přenos jalového výkonu z jedné části sítě do druhé. Potřebný jalový výkon je pak nutné regulovat přímo v místě spotřeby nebo výroby elektrické energie.

Nárůst podílu instalovaného výkonu disperzních zdrojů je provázen rychlými změnami množství energie v DS. Změny energie jsou spojeny se změnou činného výkonu zdrojů zejména z OZE a vyvolávají v soustavě změny napětí a frekvence. Instalované výkony disperzních zdrojů již dosahují významného podílu pro ovlivnění chování sítě. Konkrétním příkladem problémů, které se v propojených evropských sítích ENTSO-E již projeví, byl např. problém nedefinovaného chování výroben při dosažení frekvence 50,2 Hz. Tento příklad zdůrazňuje potřebu zapojit provozované disperzní generátory do síťových kodexů a zároveň zapojit disperzní zdroje, včetně obnovitelných, do procesů řízení sítí.

Evropské sítě ENTSO-E jsou v současné době široce propojené a jejich provozovatelé řeší nové úkoly spojené s připojováním velkého množství disperzních zdrojů v rámci podpory OZE. Provozovatelé distribučních soustav jsou v rámci komplikovaných podmínek spojených s proměnou provozovaných zdrojů nuceni řídit síť takovým způsobem, který nejlépe využívá stávající zařízení elektrických sítí. Velmi významným požadavkem se stává zlepšení stability energetických soustav. V posledních letech se již projeví problémy s přetoky výkonů a změnami frekvence a s tím spojenou stabilitou soustavy. Tyto problémy mohou být způsobeny nedostatečnou rezervou jalového výkonu při velkém zatížení sítě nebo při závažných provozních stavech po poruchách v síti. V těchto situacích je vhodné využít pro dodávku jalového výkonu i výroby z OZE, jako jsou větrné farmy používající synchronní/asynchronní generátor a IGBT měniče, FVE panely se střídači a synchronní stroje v kogeneračních jednotkách.

Na základě Energetického zákona č. 458/2000 Sb. [1] a Zákona o podpoře výroby z obnovitelných zdrojů energie č. 180/2005 Sb. [2] bylo v ČR k distribuční soustavě připojeno velké množství disperzních zdrojů. Původní provozované zdroje jsou tak doplňovány instalacemi nových zdrojů penetrovaných po celém území republiky s různými parametry pro využití jalového výkonu, který je možné využít k regulaci napětí.

Aktuální Příloha č.4 PPDS [3] implementující požadavky ENTSO-E Network Code for RfG [4] a EU 631/2016 [5] umožňuje provozovateli distribuční soustavy, i s ohledem na zajištění kvality napětí

v rozsahu provozních limitů podle ČSN EN 50160 [6], [7], využít možností regulace jalového výkonu a po posouzení technologických možností zdroje a místních podmínek rozhodnout, zda je možné tyto zdroje regulačního výkonu zařadit do systému regulace napětí.

Pro regulaci jalového výkonu se objevují zajímavé možnosti v instalacích kogeneračních jednotek například v bioplynových stanicích se soustrojím spalovací motor - synchronní stroj. Připravují se instalace soustrojí synchronní stroj s parní turbínou v teplárnách či spalovnách.

Regulaci jalového výkonu je možné výhodně využít u větrných elektráren osazených synchronním strojem nebo asynchronním strojem s vyvedeným rotorovým vinutím.

Pro samotnou realizaci režim řízení jalového výkonu  $Q = f(U)$  je možné s výhodou použít systému automatické sekundární regulace napětí - ASRU.



## 2. Cíle disertační práce

V souvislosti s vývojem připojování zdrojů na základě Zákona o podpoře výroby z obnovitelných zdrojů energie a metodikou stanovení připojitelnosti výkonu výrobní s principem dovozené  $\Delta U < 2 \%$  při  $\cos \varphi = 1$  docházelo již v roce 2010 k vyčerpání připojitelné kapacity DS. Zajímalo mě se o možnosti vyššího připojitelného výkonu výroben s využitím stávajících parametrů sítě s minimem vyvolaných investičních nákladů ze strany PDS a bez nutnosti rekonstrukce DS. Možností bylo využít na hladině VN regulaci Q/U známou jako ASRU, která byla do té doby využívána jen v soustavě VVN pro regulaci systémových zdrojů poskytujících podpůrné služby, nebo závodní elektrárny.

Po konzultaci s pracovníky Řízení sítí a Rozvoje společnosti ČEZ Distribuce na Moravě jsem navrhl vhodnou lokalitu pro instalaci regulace ASRU. Podmínkou byla výrobní s OZE, instalovaným činným výkonem nad 1 MW. Vybrána byla lokalita s VTE v Kopřivně se sumárním Pinst 4,6 MW (2 x 2,3 MW) s omezenou hodnotou RV na 4,3 MW, kde jsem s provozovatelem výrobní domluvil změnu podmínek připojení, navýšení RV výrobní na 4,6 MW, instalaci regulace Q/U na konstantní napětí a osazení potřebného měření v předávacím místě výrobní za účelem vyhodnocení vlivů výrobní. Měření je zajištěno modulem RTU7 s přenosem dat a informací z výrobní na dispečink obsahuje potřebné 4Q měření P, Q, U a I [17]. Na základě naměřených výsledků chci vyhodnotit prokázání souvislosti instalace vyššího činného výkonu s regulací Q/U bez negativního ovlivnění kvality napětí v soustavě oproti původně stanovenému nižšímu připojitelnému výkonu s konstantním  $\cos \varphi = 1$ .

Za účelem kontroly a potvrzení výsledků nasazení regulace jsem navrhl další instalaci regulace Q/U na kogenerační jednotce 999 kW v Moravském Berouně. Měření je opět zajištěno modulem RTU7 s přenosem dat a informací z výrobní na dispečink obsahuje potřebné 4Q měření P, Q, U a I [17]. Na základě naměřených výsledků chci potvrdit možnost instalace vyššího činného výkonu s regulací Q/U bez negativního ovlivnění kvality napětí v soustavě.

Disertační práce se věnuje z pohledu provozovatele distribuční soustavy možnostem regulace jalového výkonu za účelem zvýšení stability napětí u zdrojů el. energie provozovaných paralelně s distribuční soustavou na hladině VN, zejména instalovaných zdrojů využívajících obnovitelnou energii. Jalový výkon je významná fyzikální veličina regulace napětí v distribuční soustavě. Regulaci napětí jalovým výkonem umožňuje dispečersky říditelný systém ASRU, které umožňuje efektivně využít jalový výkon v prospěch distribuční soustavy a také v prospěch konečného spotřebitele, zákazníka PDS, v průběhu celoročního provozu distribuční soustavy. Z technického hlediska jde o využití jalového výkonu provozovaných zdrojů v soustavě s ohledem na kvalitu energie, hospodárnost a bezpečný provoz soustavy. Z právního hlediska je nutný soulad zájmů provozovatele distribuční soustavy při provozu soustavy a provozovatele výrobní při paralelním provozu zdroje s distribuční soustavou. Regulace napětí prostřednictvím ASRU umožňuje velmi dobrou kontrolu nad tokem jalového výkonu v distribuční soustavě a stabilizaci napěťových poměrů při různých provozních stavech soustavy.

Předpokladem provozu ASRU je eliminace problémů s kolísáním napětí ve vybraném uzlu. Navíc ASRU pracuje zcela automaticky a nevyžaduje dispečerskou obsluhu.

Vlastní regulace je realizována změnou hodnoty jalového výkonu v závislosti na skutečné a požadované hodnotě napětí v měřeném bodě soustavy. Množství regulovaných prvků je různé. Do regulace mohou být obecně zapojeny nejen generátory výrobní, ale i další prvky v uzlu soustavy jako

tlumivky, kompenzátory a transformátory. Záleží na požadavcích PDS, PQ diagramu výroby, možnostech velikosti a tvrdosti regulovaného uzlu a požadovaném rozsahu regulace.

V disertační práci jsou využity výsledky měření průběhů  $P$ ,  $Q$ ,  $U$  z provozovaných výroben splňujících podmínky předepsané regulace jalového výkonu – ASRU ve dvou lokalitách:

- Větrný park v lokalitě Kopřivná – instalovány 2 kusy větrných turbín fy Enercon s generátory E-82 E2/2300 kW. Na základě požadavku žadatele na navýšení hodnoty přetoku rezervovaného výkonu do DS předepsal PDS provozovateli VTE instalaci ASRU s regulací na konstantní napětí. Původní regulace jalového výkonu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  byla změněna na režim s regulací jalového výkonu  $Q = f(U)$ .
- Kogenerační jednotka v lokalitě Moravský Beroun – instalován 1 kus KGJ Quanto D1200 s generátorem 999 kW. Po dohodě s provozovatelem KGJ byla za účelem zvýšení stability napětí změněna původní regulace jalového výkonu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  na režim s regulací jalového výkonu  $Q = f(U)$  a doinstalováno ASRU s regulací na konstantní napětí.

#### **Jednotlivé části řešení disertační práce:**

- Shrnutí koncepce a principu napětí
- Měření vlivu instalace ASRU na VTE Kopřivná
- Měření vlivu instalace ASRU na KGJ Moravský Beroun
- Vyhodnocení měření s regulací jalového výkonu v režimu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$
- Vyhodnocení měření s regulací jalového výkonu v režimu  $Q = f(U)$
- Statická analýza naměřených dat
- Vyhodnocení instalace systému ASRU a přínos regulace jalového výkonu za účelem zvýšení stability napětí v soustavě
- Doporučení pro metodiku návrhu a podmínek pro instalaci ASRU v sítích PDS

### **3. Legislativa podporující výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie**

#### **3.1. Vývoj v legislativě podporující OZE**

Legislativa na podporu OZE vychází ze směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/77/ES o podpoře elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů energie na vnitřním trhu s elektřinou [8]. V této Směrnici uznává společenství potřebu podporovat obnovitelné zdroje energie, jelikož jejich využívání přispívá k ochraně životního prostředí a podporuje principy udržitelného rozvoje. Účelem Směrnice je podporovat zvýšení příspěvku obnovitelných zdrojů energie k výrobě elektřiny. Tento rámec by měl v budoucnu umožnit, aby elektřina z OZE mohla soutěžit s elektřinou vyrobenou z neobnovitelných zdrojů energie. Zákonu předcházela zákon č. 406/2000 Sb. - o hospodaření energií [9].

Parlament České republiky přijal na základě Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2001/77/ES zákon č. 180/2005 Sb. O podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie [2], který vymezuje oblasti podpory a využití OZE. Zákon měl zajistit využití OZE, trvalé zvyšování podílu OZE na spotřebě primárních energetických zdrojů, přispění k šetrnému využívání přírodních zdrojů a naplnění indikativního cíle podílu elektřiny z obnovitelných zdrojů na hrubé spotřebě elektřiny v České republice ve výši 8 % k roku 2010. Záměr zákona na zvýšení podílu výroby elektrické energie z OZE byl podpořen vysokým nastavením výkupních cen cenovým rozhodnutím ERÚ garantovaných státem po dobu 20 let.

#### **3.2. Současná legislativa podporující připojení výroben**

Pravidla pro udržení vysoké úrovně bezpečnosti dodávek energie jsou v rámci Evropy zapracována do síťových kodexů, které sjednocují podmínky jednotlivých členských zemí a stanovují postupy pro všechny zájemce o připojení.

Uvedená pravidla jsou v legislativě Evropské unie zpracována v rámci kodexu ENTSO-E Requirements for generators (NC RfG) [4] a jako standardy technické specifikace CENELEC CLC/FprTS 50549-1-Part 1 [13] a CLC/FprTS 50549-2-Part 2 [14]. V roce 2016 vydala Evropská unie Nařízení komise (EU) 2016/631 [5], kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě.

Nově definované požadavky v kodexu NC RfG a standardy CENELEC jsou stanoveny s cílem připojit k síti další zdroje a zároveň zajistit bezproblémový přenos energie ve stabilní soustavě. Kodex je prostředkem pro vytvoření efektivního celoevropského trhu s technologiemi pro výrobu elektrické energie. Pro konstrukci generátorů a jejich provozní vlastnosti jsou zaváděny pokročilé funkce podporující bezpečné řízení sítě v bodě připojení, zejména poskytnutí jalového výkonu Q.

Do legislativy české republiky jsou nové standardy zpracovány jako technické směrnice v ČSN a PNE. Normy platí pro plánování připojování a provozování výrobních elektrických zařízení do distribučních soustav na hladině NN a VN. Pro hladinu VVN není technická norma vydána. Základní pravidla pro posouzení připojitelnosti výroben na hladině VVN jsou uvedena v Příloze č. 4 PPDS.

#### **3.3. Energetický zákon**

Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, obecně nazývaný Energetický zákon [1]. Zpracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje podmínky podnikání a výkon státní správy v elektroenergetice a dalších energetických odvětvích. Upravuje související práva a povinnosti fyzických

a právnických osob. Definuje účastníky trhu s elektřinou: výrobci elektřiny, provozovatel přenosové soustavy, provozovatelé distribučních soustav, operátor trhu, obchodníci s elektřinou, zákazníci.

EZ zajišťuje právo na připojení výrobní každému žadateli, který o připojení požádá a splňuje podmínky připojení stanovené Pravidly provozování distribuční soustavy.

### **3.4. Vyhláška o připojení**

Vyhláška č.16/2016 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě, obecně nazývaná Vyhláška o připojení. Stanovuje legislativní úpravu pro vydání podmínek a způsobu připojení výroben elektřiny, distribučních soustav a odběrných míst zákazníků k elektrizační soustavě a stanovení podílu nákladů spojených s připojením a se zajištěním požadovaného výkonu či příkonu. Podle metodiky vyhlášky vyhodnocuje distributor podanou žádost o připojení, posuzuje parametry požadovaného zařízení s ohledem na vyhodnocení zpětných vlivů na síť a stanovuje podmínky připojení k distribuční soustavě. V případě kladného posouzení stanovuje distributor žadateli podmínky připojení zasláním návrhu smlouvy o připojení, nebo v případě nutnosti úpravy DS smlouvy o budoucí smlouvě o připojení [15].

### **3.5. Příloha č. 4. - PPDS**

Příloha č. 4. - Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy je samostatnou metodikou pro posouzení vlivu a připojitelnosti výroben a stanovení podmínek provozu pro paralelní provoz výroben s DS [3].

Zajištění bezpečného a spolehlivého provozu za normálního provozu, včetně přechodových jevů v ES ČR, si vyžádalo sjednocení technických parametrů i požadavků na chování výroben. Nařízení komise (EU) 2016/631 [5] definuje podle jmenovitých činných výkonů  $P_n$  výrobních modulů kategorie výrobních modulů třídy A, B, C a D.

## **4. Nové pokročilé funkce spojené s provozem výroben**

Provozní vlastnosti a konstrukce generátorů musejí splňovat pokročilé funkce podporující bezpečné řízení sítě v bodě připojení. Požadavky vycházejí z kodexu NC RfG a standardů CENELEC s cílem připojit k síti další zdroje a zajistit stabilní soustavu.

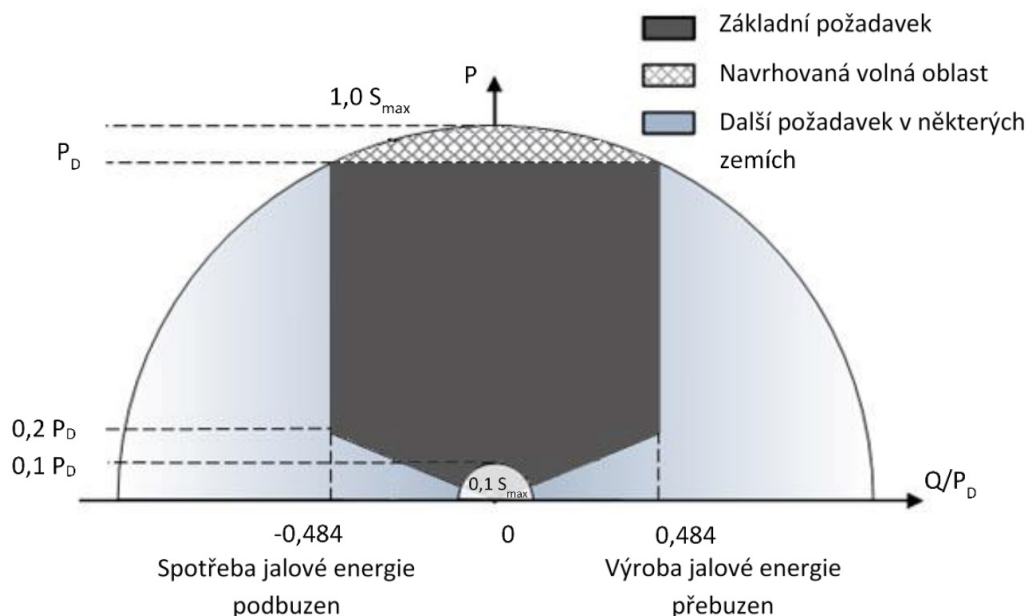
Způsoby podpory sítě vyplývají z normy CLC/FpR TS 50549-2 [14], PNE 33 3430-8-2 [16] a Přílohy č.4 PPDS [3].

### **4.1. Zásady podpory sítě**

Výrobní zařízení musí být schopna se při dodávce do sítě podílet na udržování napětí. Rozlišuje se mezi statickou a dynamickou podporou sítě. Požadované hodnoty a charakteristiky pro podporu sítě udává PDS. Dodržování zadaných hodnot zajišťuje automatické řízení ve výrobně [3], [35]-[39].

#### **Podpora napětí pomocí jalového výkonu**

Výkyvy napětí musí zůstat v povolených mezích. Výrobní moduly a výrobní musí být schopny přispívat k tomuto požadavku během normálního provozu sítě. Výrobna musí být schopna splnit požadavky uvedené níže v celém provozním rozsahu napětí a kmitočtu. Grafické znázornění minimálních i nepovinných požadavků dodávky/odběru jalového výkonu při jmenovitém napětí je na obr. 1, kde  $P_D$  je návrhový výkon výrobní.

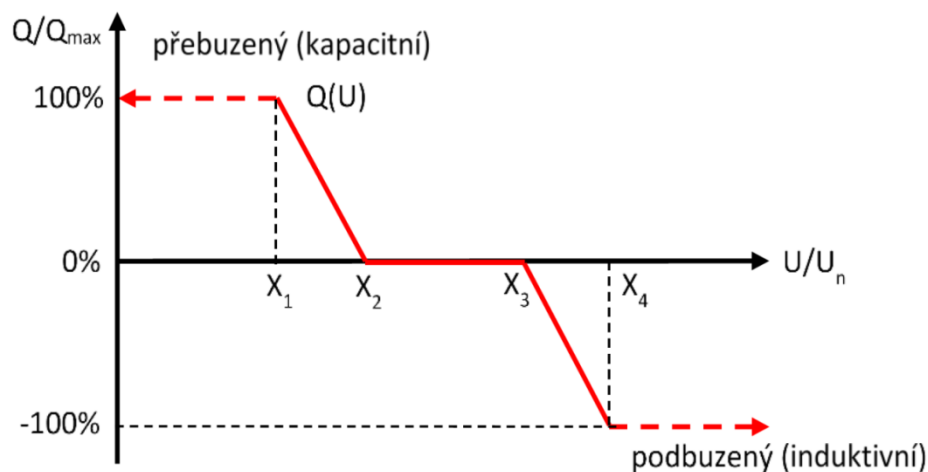


Obr. 1 Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při jmenovitém napětí pro VM na VN a 110kV

#### 4.2. Řízení jalového výkonu

Součástí stanovení podmínek připojení je posouzení možností řízení jalového výkonu zdroje v závislosti na provozních podmínkách DS [3], [17], [35]-[39].

Charakteristická křivka podle obr. 2 musí být nastavitelná, nastavení určuje PDS.



Obr. 2 Charakteristika funkce  $Q(U)$

QU charakteristika je definována čtyřmi body, které definují tvar regulační charakteristiky.

- Bod  $X1 = 0,94$  - odpovídá maximálnímu dodávanému  $Q$  výrobny pro zvýšení hodnoty napětí
- Bod  $X2 = 0,97$  - počáteční hodnota pro dodávku  $Q$  pro zvýšení napětí v místě připojení
- Bod  $X3 = 1,05$  - odpovídá počáteční hodnotě odběru  $Q$  pro snížení napětí v místě připojení
- Bod  $X4 = 1,0$  - odpovídá maximálnímu odebíranému  $Q$  výrobny pro snížení hodnoty napětí

Řízení jalového výkonu v rozsahu účinniku výrobny je v rozsahu 0,90 kapacitní a 0,90 induktivní a musí být kdykoliv využitelné.

## 5. Automatická sekundární regulace napětí – ASRU

### 5.1. Regulace napětí jalovým výkonem

Řízení jalového výkonu vychází z paralelního provozu výrobní P a Q se sítí. Základní úlohou je zjištění potřebného regulačního Q k vyrovnání odchylky  $\Delta U$  od požadovaného napětí. Při provozu je požadováno dosažení minimální odchylky. Principiálně jde o paralelní kompenzaci jalovým výkonem v místě připojení výrobní k DS.

Pro změnu hodnoty napětí v síti potřebujeme zajistit potřebnou velikost a směr toku jalového výkonu. Z obecného vztahu pro výpočet změny napětí na impedanci mezi dvěma body sítě:

$$\Delta U = \frac{X \cdot Q_2}{U_2} \quad (kV; \Omega; kVAr; kV) \quad (4)$$

vyjádříme hodnotu potřebného jalového výkonu pro potřebu regulace:

$$Q_2 = \frac{U_2 \cdot \Delta U}{X} \quad (kVAr; kV; \Omega; kV) \quad (5)$$

kde  $\Delta U$  je změna napětí

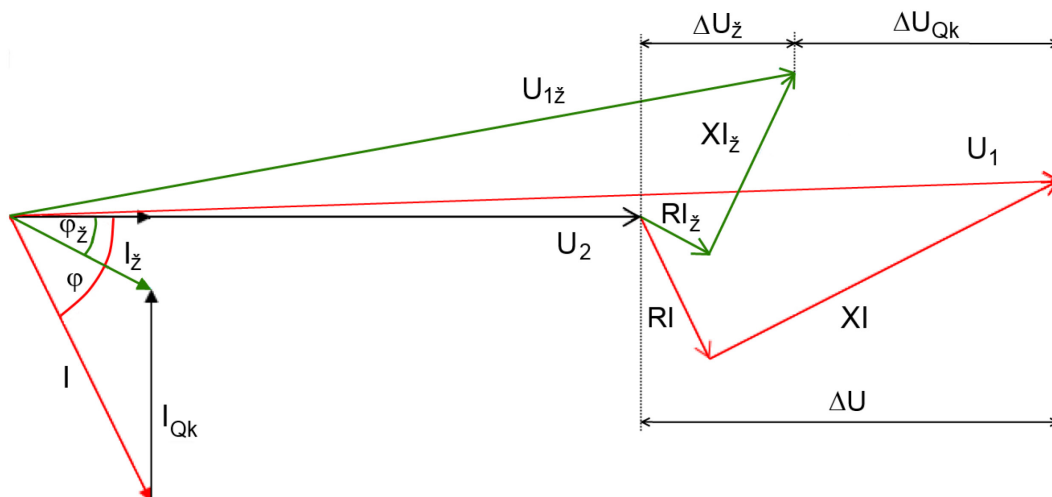
$X$  - hodnota impedance vedení

$U_2$  - napětí v místě napojení zdroje na DS

$Q_2$  - hodnota jalového výkonu v místě napojení zdroje na DS

Z rovnic (4), (5) je vidět závislost jalového výkonu a napětí kde  $Q = f(U)$ , která je využita v automatizovaných systémech regulace napětí [18]-[20], [35]-[39].

Fázorový diagram na obr. 3 znázorňuje změnu napěťových poměrů zásahem regulace ASRU.



Obr. 3 Fázorový diagram regulace napětí jalovým výkonem

Červené fázory  $U_1$ ,  $I$ ,  $\varphi$  znázorňují poměry před regulací. Zelené fázory  $U_{1z}$ ,  $I_z$ ,  $\varphi_z$  znázorňují poměry po regulaci. Hodnota  $\Delta U$  je velikost rozdílu skutečného a žádaného napětí a je úměrná velikosti jalového výkonu  $Q_2$  z rovnice (4), (5). Hodnota  $\Delta U_z$  představuje požadovanou hodnotu rozdílu napětí. Požadovaná je minimální hodnota, tedy  $\Delta U_z \rightarrow 0$ . Hodnota  $\Delta U_{Qk}$  představuje rozdíl napětí po regulačním zásahu. Potřebný regulační jalový výkon  $Q_k = Q_2 - Q_z$ . Výrobu jalového výkonu  $Q_k$  můžeme uskutečňovat změnou buzení generátorů. Toho dosáhneme regulovanou výrobou jalového výkonu v místě spotřeby.  $I_{Qk}$  ve fázorovém diagramu znázorňuje jalový proud regulačního výkonu výrobní  $Q_k$ .

## 5.2. Princip ASRU

ASRU průběžně vyrovnává bilanci jalového výkonu ve vybraném pilotním uzlu soustavy na zadané hodnotě napětí. Do pilotních uzlů je vyveden výkon různých typů výroben nebo kompenzační prostředky. V pilotních uzlech je možné průběžně řídit změnu dodávky jalového výkonu a ovlivňovat místní napěťové poměry. Cílem uvedené regulace je stabilizovat napěťové poměry v pilotním uzlu soustavy.

$$\Delta U_i = a_{ij} \cdot Q_j \quad (kV; kV/kVAr; kVAr) \quad (3)$$

$\Delta U_i$  – změna napětí v pilotním uzlu i

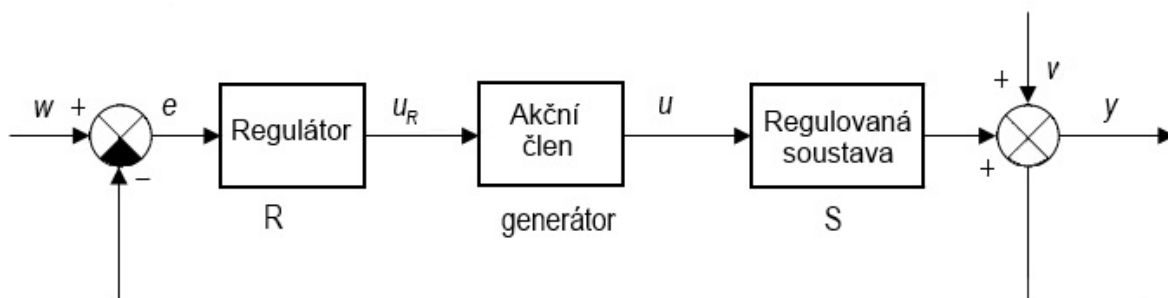
$a_{ij}$  – koeficient citlivosti změny napětí v uzlu i na změnu jalového výkonu v uzlu j

$Q_j$  – změna jalového výkonu v uzlu j

Z rovnice (3) vyplývá závislost velikosti změny napětí na velikosti změny dodávky jalového výkonu a koeficientu citlivosti mezi počítanými uzly soustavy. Změna jalového výkonu v uzlu s vyšším koeficientem citlivosti vyvolává větší změnu napětí. Menší zdroj jalového výkonu umístěný v napěťově citlivém uzlu soustavy bude mít podobný výsledek pro řízení jalového výkonu, jako větší zdroj v místě s nižší citlivostí v napěťově tvrdší soustavě [18], [19].

## 5.3. Realizace regulace napětí a jalového výkonu v distribuční soustavě

Regulace napětí v DS využívá principu uzavřeného regulačního obvodu se zápornou zpětnou vazbou podle obr. 4. Na základě zjištěné regulační odchylky mezi žádanou a regulovanou veličinou nastaví regulátor akční veličinu tak, že se regulační odchylka zmenší na úroveň tolerance. Cílem regulace je rovnost mezi regulovanou a žádanou veličinou. Příčinou odchylky může být vliv poruchy nebo změna požadované hodnoty [17], [18], [35]-[39].



Obr. 4 Blokové schéma regulátoru se zápornou zpětnou vazbou

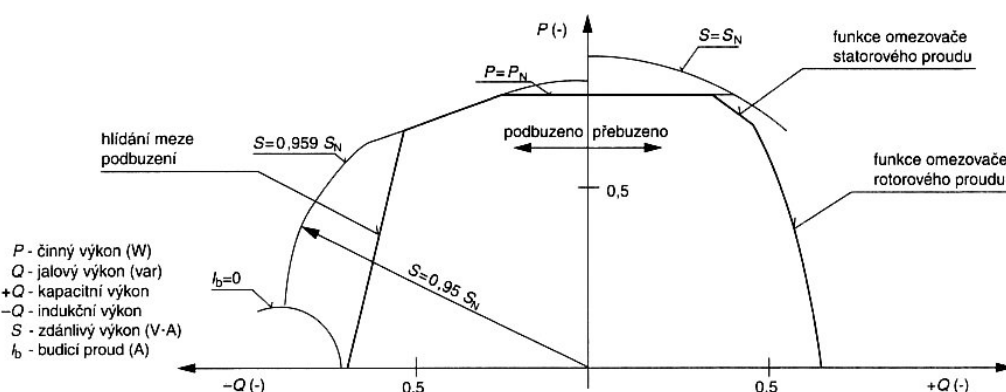
Mezi dispečinkem PDS a výrobcem je zajištěn komunikační kanál pro předání požadované hodnoty napětí v uzlu. Regulátor průběžně vyhodnocuje aktuální odchylku napětí, vypočte celkovou změnu potřebného jalového výkonu pro eliminaci odchylky a podle regulační rezervy jalového výkonu provede rozdělení požadavku na regulátor buzení generátoru.

## 6. Zdroje činného výkonu a možnost řízení jalového výkonu

### 6.1. Synchronní výrobní moduly

Synchronní výrobní modul má na výstupu synchronní stroj, schopný vyrábět elektrickou energii tak, že frekvence vyrobeného napětí, rychlost generátoru a frekvence napětí v síti jsou ve stálém poměru, a tedy v synchronismu. Modul je náfázován přímo na DS.

Synchronní generátor je možné provozovat podle potřeby jalového výkonu v podbuzeném stavu s odběrem jalové energie nebo v přebuzeném stavu s dodávkou jalové energie. Výrobu jalového výkonu regulujeme změnou buzení synchronního stroje. Využíváme znalost budicí charakteristiky zdroje. Buzení stroje je ovlivněno několika faktory, jako je výkon stroje, maximální dovolený proud statoru, mez budicího proudu a omezení statickou stabilitou. Typický PQ diagram synchronního stroje je uveden na obr. 5.

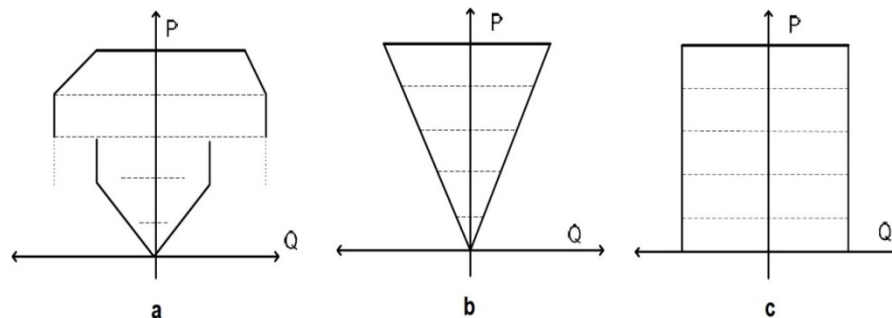


Obr. 5 Provozní PQ diagram synchronního stroje

### 6.2. Nesynchronní výrobní moduly a možnost řízení jalového výkonu

Nesynchronní výrobní modul je generátor vyrábějící elektřinu, který je k soustavě připojen nesynchronně nebo je připojen prostřednictvím výkonové elektroniky. Frekvence vyrobeného napětí, rychlost generátoru a frekvence napětí v síti nejsou synchronizovány. Na jeho výstupu je asynchronní stroj nebo střídač.

Typickým zástupcem jsou větrné elektrárny s asynchronními stroji napájenými frekvenčním měničem do rotoru s možností buzení. Dále zdroje, které jsou do sítě připojeny přes plnovýkonový měnič: fotovoltaické panely se střídači a větrné elektrárny se synchronním strojem se střídačem na výstupu. Na obr. 6 jsou ukázány tvary provozních diagram jednotlivých typů [21].



Obr. 6 Typy PQ diagramů se střídači:

a) dvojitě napájený asynchronní generátor, b) a c) plnovýkonový měnič



## 7. Měření potřebných dat pro vyhodnocení vlivu regulace

Pro potřeby vyhodnocení vlastností  $Q/U$  regulace a vlivu  $P$  a  $Q$  na napětí v místě připojení jsem využil instalované obchodní a dispečerské měření [3], [17], v předávacích místech jednotlivých výroben. Obchodní měření jsou instalována na primární straně transformátoru v kobce VN rozvaděče pro měření. 4Q elektroměr obchodního měření je přes zkušební svorkovnici připojen k měřicím transformátorům proudu a napětí. Naměřená data jsou předávána z výroby na dispečink GSM modulem.

### VTE Kopřivná

Obchodní měření je osazeno 4Q elektroměrem splňujícím požadavky na stanovené měřidlo. 1. vinutí 3 x MTP 3x125/5/5A, TP 0,5S, 10VA. 1. vinutí 3 x MTN 3x22000/ $\sqrt{3}$ //100/ $\sqrt{3}$ //100/ $\sqrt{3}$ , TP 0,5, 10VA. Měřené hodnoty 3 x  $U_s$ , 3 x  $I_f$ , +A, +Rc, +Ri, -A, -Rc, -Ri. Vzorky měření v 15 minutových intervalech.

Dispečerské měření je zajištěno modulem RTU7 se 4Q měřením a přenosem dat a informací z výroby na dispečink. 2. vinutí 3 x MTP 3x125/5/5A, TP 0,5S, 10VA. 2. vinutí 3 x MTN 3x22000/ $\sqrt{3}$ //100/ $\sqrt{3}$ //100/ $\sqrt{3}$ , TP 0,5, 10VA. Měřené hodnoty  $P$ ,  $Q$ ,  $U_s$  a  $I_f$ . Vzorky měření ukládány v 1 sekundových nebo 1 minutových intervalech.

### KGJ Moravský Beroun

Obchodní měření je osazeno 4Q elektroměrem splňujícím požadavky na stanovené měřidlo. 1. vinutí 3 x MTP 3x30/5/5A, TP 0,5S, 10VA. 1. vinutí 3 x MTN 3x22000/ $\sqrt{3}$ //100/ $\sqrt{3}$ //100/ $\sqrt{3}$ , TP 0,5, 10VA. Měřené hodnoty 3 x  $U_s$ , 3 x  $I_f$ , +A, +Rc, +Ri, -A, -Rc, -Ri. Vzorky měření v 15 minutových intervalech.

Dispečerské měření je zajištěno modulem RTU7 se 4Q měřením a přenosem dat a informací z výroby na dispečink. 2. vinutí 3 x MTP 3x30/5/5A, TP 0,5S, 10VA. 2. vinutí 3 x MTN 3x22000/ $\sqrt{3}$ //100/ $\sqrt{3}$ //100/ $\sqrt{3}$ , TP 0,5, 10VA. Měřené hodnoty  $P$ ,  $Q$ ,  $U_s$  a  $I_f$ . Vzorky měření ukládány v 1 sekundových nebo 1 minutových intervalech.

Zpracování a vyhodnocení naměřených dat, včetně grafických výstupů, jsem provedl v aplikaci Excel MS Office.

### 7.1. Statistická analýza

Pro posouzení dosažené kvality regulace  $Q = f(U)$  je použita exploratorní statistická analýza s popisem základních vlastností výběrového souboru. Na základě zjištěných informací ve výběrovém souboru mohou usuzovat o vlastnostech celé populace, tedy o výsledné kvalitě napětí ovlivněné funkční regulací.

Zkoumané vlastnosti sleduji prostřednictvím měřitelných vlastností kvalitativní proměnné, kdy datový soubor získaný náhodným výběrem je následně popsán číselnými výběrovými charakteristikami [22], [23], [34].

Datový soubor získaný náhodným výběrem lze znázornit pomocí číselných charakteristik, které nazýváme výběrové charakteristiky, které zpravidla dělíme na:

- Míry polohy – určují typické rozložení hodnot souboru.
- Míry variability – určují variabilitu (rozptyl) hodnot kolem své typické hodnoty.

Pro vyhodnocení kvality napětí byl vybrán výběrový soubor měřených dat z ucelené řady 1 minutových vzorků kontinuálního měření parametrů sítě bez výpadků v průběhu 24 hodin. Byly vybrány intervaly, kdy výsledný průběh napětí je výsledkem vlivu odběru v DS a vlivem činného a jalového výkonu v rámci pracovního bodu dostupného PQ diagramu v různých režimech provozu výroby.

Statistické vyhodnocení měřených dat posuzuje dosažené hodnoty sdružených napětí v režimu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  a v režimu regulace  $Q = f(U)$ .

Posuzovány byly naměřené hodnoty napětí fáze UL1. Posouzení fáze L1 je pro statistické vyhodnocení vlivu regulace Q na výsledné napětí dostatečně reprezentativní. Průběhy hodnot napětí dalších fází UL2 a UL3 jsou podobné a nejsou uváděny.

Základní statistické charakteristiky jsem získal využitím implementovaných vzorců nad tabulkovými daty v prostředí MS Office Excel.

## **8. Větrná energie a výroba elektřiny z VTE**

Současné větrné stroje na výrobu elektřiny z větru nazýváme větrné turbíny. Pro účely výroby elektrické energie jsou v dnešní době nejpoužívanějším typem vztlakové turbíny. Využívají síly vznikající na rotorovém listu při obtékání vzduchem, tzv. aerodynamické vztlakové síly. Tato síla vzniká díky speciálně tvarovanému profilu lopatek, podobnému křídlu letadla. Větrný motor využívá vztlakové síly na lopatce a lopatka větrné turbíny pracuje jako rotující křídlo. Na list rotoru působící dvě síly. Vztlková síla, která je příčinou rotačního pohybu vrtule a síla odporová, která působí proti směru pohybu [25]-[27].

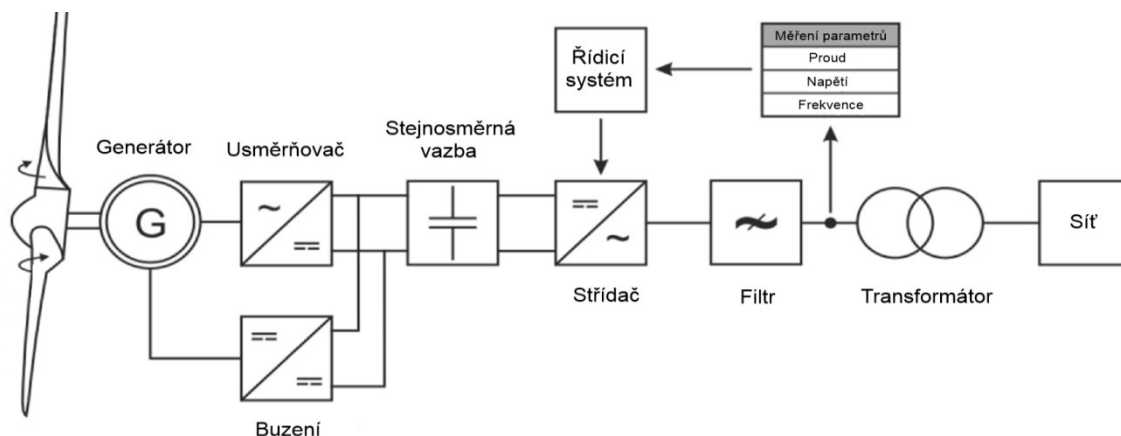
### **8.1. Aplikace regulace ASRU v lokalitě VTE Kopřivná**

V lokalitě Kopřivná v oblasti Jeseníky je instalován větrný park se 2 kusy větrných turbín firmy Enercon s typovým označením E-82 E2 s činným výkonem 2300 kW. Synchronní generátor je od sítě oddělen frekvenčním měničem zajišťujícím široký rozsah řízení napětí, frekvence a jalového výkonu. Větrný park je připojen k vedení VN 3x70 AlFe ve vzdálenosti 4 km od R 110/22 kV Hanušovice.

### **8.2. Parametry generátoru Enercon**

Základem větrné turbíny fy Enercon je 3fázový synchronní generátor spojený bez převodovky přímo s rotorem turbíny. Generátor je (pomaloběžný, mnohapolový, synchronní) prstencový generátor bez přímého spojení se sítí. Výstupní napětí a frekvence generátoru se mění s rychlostí otáčení rotoru. Hodnoty napětí a frekvence generátoru jsou přes stejnosměrnou spojku (DC link) s usměrňovačem, filtračním kondenzátorem a střídačem parametrizovány na požadované hodnoty v distribuční síti. Tento typ stroje zajišťuje minimální negativní vlivy na síť. Schéma VTE je na obr. 7.

Parametry synchronního generátoru: jmenovitý výkon  $P_n$  2,3 MW,  $S_n$  – 2,3 MVA, frekvence 50 Hz, napětí generátoru  $U_n$  – 400 V, jmenovitý proud  $I_n$  – 3320 A, Maximální hodnota jalového výkonu  $Q_{\max}$  – 980 kVAr dodávka/odběr [28], [39].



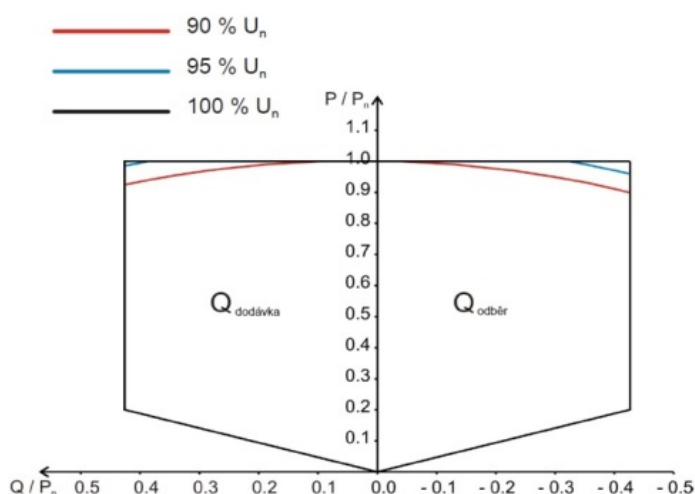
Obr. 7 Schéma zapojení VTE Enercon

### 8.3. PQ diagram synchronního generátoru VTE

Větrná turbína poskytuje široký rozsah jalového výkonu. Tento jalový výkon je k dispozici síti jako vysoce dynamická služba. Řízení jalového výkonu je nezbytné pro udržení stabilní hodnoty napětí. Regulace  $Q = f(U)$  je využívána při regulaci napětí systémem ASRU. Využitím jalového výkonu lze kompenzovat parametry provozovaných síťových zařízení a je možné dosáhnout stabilního a efektivního řízení sítě.

Generátory Enercon E-82 E2/2300 kW využívají široký rozsah jalového výkonu pro pracovní bod mezi 20 % a 100 % jmenovitého činného výkonu. Hodnoty  $Q = 980 \text{ kVar}$  je dosaženo v mezích znázorněných na obr. 8 pro poměr  $Q_{\max} / P_{\max} = \pm 0,426$ . Rozsah účinníku 0,91 ind. – 0,91 kap [28], [39].

Je-li dosaženo mezní hodnoty zdánlivého výkonu  $S_{\max}$  a v důsledku dobrých větrných podmínek je možné zvýšení činného výkonu, sníží se fázový úhel  $\varphi$  a omezí se hodnota jalového výkonu. Při dosažení maxima činného výkonu se dále snižuje rezerva jalového výkonu a snižují se regulační možnosti pro regulaci napětí. Tuto skutečnost je nutné při regulaci napětí vzít v úvahu.

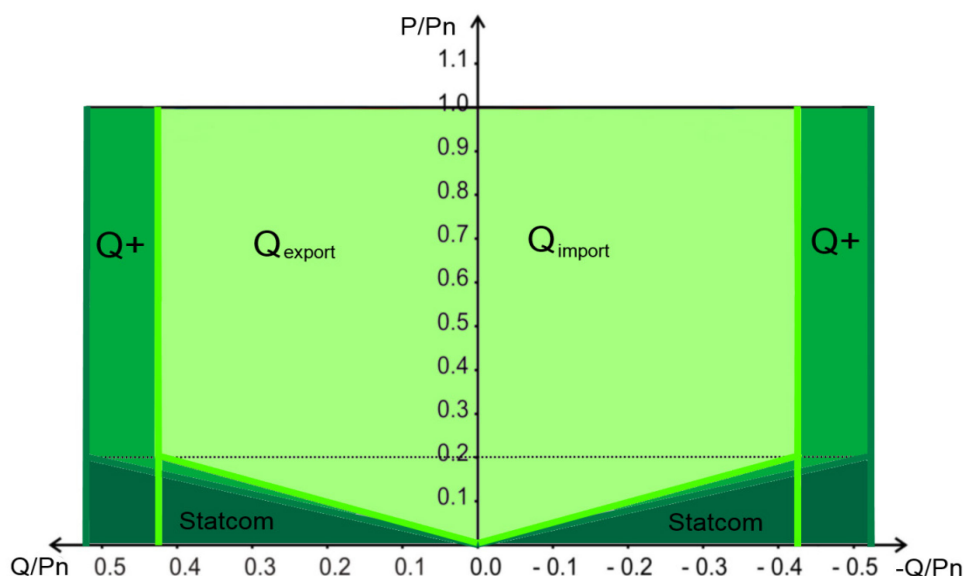


Obr. 8 PQ diagram VTE Enercon - základní rozsah

Pokud je to žádoucí, může být základní rozsah jalového výkonu generátoru rozšířen nainstalováním dalšího střídače v mezích  $Q^+$  znázorněných v obr. 9 s možností využitelného jalového výkonu až na 1590 kVar. Limitní poměr  $Q^+/P_n = \pm 0,691$  odpovídá účinniku 0,82 ind. – 0,82 kap [28], [39].

Při dodávce jalového výkonu do sítě odpovídá chování výrobního modulu synchronnímu generátoru v přebuzeném stavu. Při odběru jalového výkonu ze sítě odpovídá chování výrobního modulu synchronnímu generátoru v podbuzeném stavu.

Další rozšíření rozsahu jalového výkonu může být dále zajištěno modulem STATCOM. Výsledkem je poskytnutí jalového výkonu i v oblasti 0 – 20 % výroby činného výkonu (P). V rámci PQ diagramu je tak možné poskytnout elektrické síti pouze jalový výkon bez dodávky činného výkonu. Chování výrobního modulu odpovídá kompenzátoru.

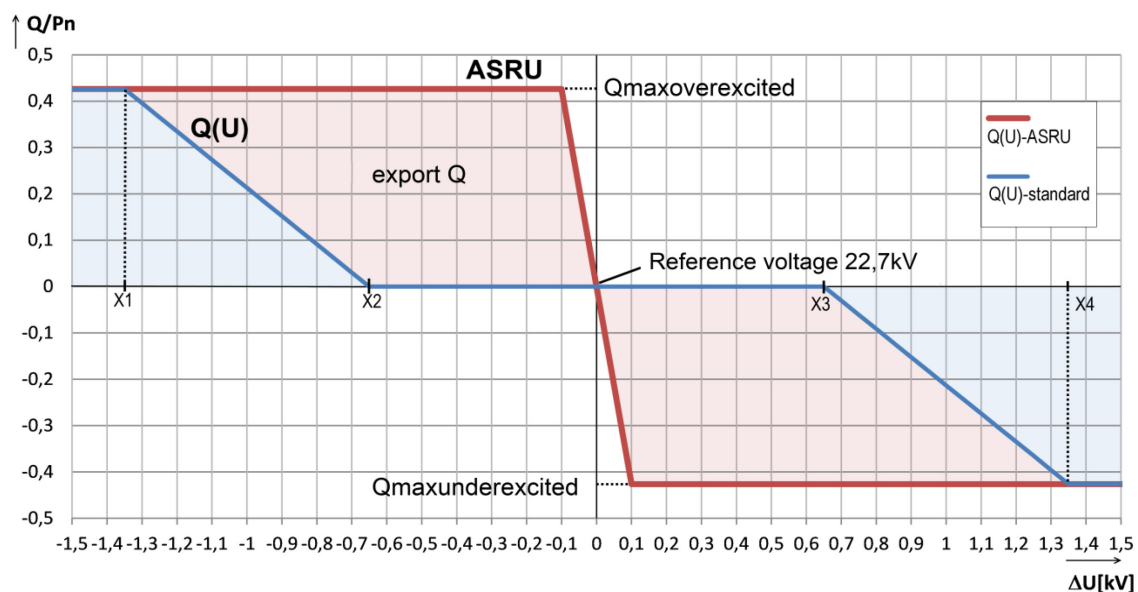


Obr. 9 PQ diagram VTE Enercon rozšířený rozsah  $Q^+$ , Statcom

#### 8.4. Řízení napětí a jalového výkonu větrné turbíny Enercon

Při regulaci napětí je fázový úhel generátoru řízen charakteristikou  $Q = f(U)$  podle rozdílu skutečného a požadovaného napětí. Napětí v napájecím místě je zvyšováno nebo snižováno v závislosti na provozní charakteristice stroje.

Na obr. 10 je modrou barvou uvedena standardní charakteristika  $Q(U)$  dle Přílohy č.4 PPDS. Hodnoty parametrů  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  a  $X_4$  představují princip autonomní regulace. V rámci zkušební provozu VTE Kopřivná byla na základě místních podmínek s PDS konzultována úprava a optimalizace standardní charakteristiky pro využití ASRU(červená). Rozsah maximálního jalového výkonu ( $Q_{max}$  a  $-Q_{max}$ ) odpovídá účinniku  $\cos \varphi$  0,92 při jmenovitém  $P_n$ . Pásmo necitlivosti je nastaveno  $\pm 0,5 \%U$  ( $\pm 0,11$  kV). Tím je vyloučena zbytečná regulace v požadovaném rozsahu napětí. Gradient byl změněn tak, že pro napětí odchylky vyšší než 0,11 kV od  $U$  referenčního přispívá VTE svým maximem jalového výkonu [39].



Obr. 10 Enercon - Regulační křivka  $Q = f(U)$

### 8.5. Aplikace ASRU na VTE Koprivná

Definované algoritmy funkce ASRU jsou naprogramovány v automatické modulu řídicí jednotky UniNOD Compact – obr. 11.



Obr. 11 Modul ŘJ ASRU

UniNOD je kompaktní ŘJ určená pro montáž na lištu DIN. Je vybavena výkonným procesorem (400 MHz procesor Freescale) s jádrem PowerPC, řadou komunikačních rozhraní (Ethernet, RS 232, 422/485) a podle varianty také integrovanými digitálními a analogovými vstupy/výstupy.

Instalované ASRU reguluje hodnotu napětí na hladině vn. Generátory jsou ovládány řídicím systémem VTE se kterým ASRU komunikuje prostřednictvím protokolu IEC 870-5-104 po Ethernetu. Interface ovládání relé RS232-1 - protokolem RTU MODBUS.

ŘJ VTE umožňuje ovládání větrné turbíny, včetně řízení napětí v souladu s požadavky Přílohy č.4 PPDS. V závislosti na stanovených podmínkách připojení definovaných PDS nabízí ŘJ rychlé ovládání VTE s dobou odezvy méně než 1 s.

ASRU udržuje napětí až do vyčerpání rezervy jalového výkonu  $Q_{max}$ . Požadovaná hodnota  $U$  je zadána PDS na hodnotě 22,7 kV s tolerancí 0,11 kV, tedy 0,5 %  $U$ . Dodržení pásma 22,6 kV - 22,8 kV

kontroluje výpočetní SW ASRU v intervalu 60 sekund. Maximální krok regulace Q je 0,5 MVar. Pro aplikace s ASRU se používá hodnota sdruženého napětí v pilotním bodě.

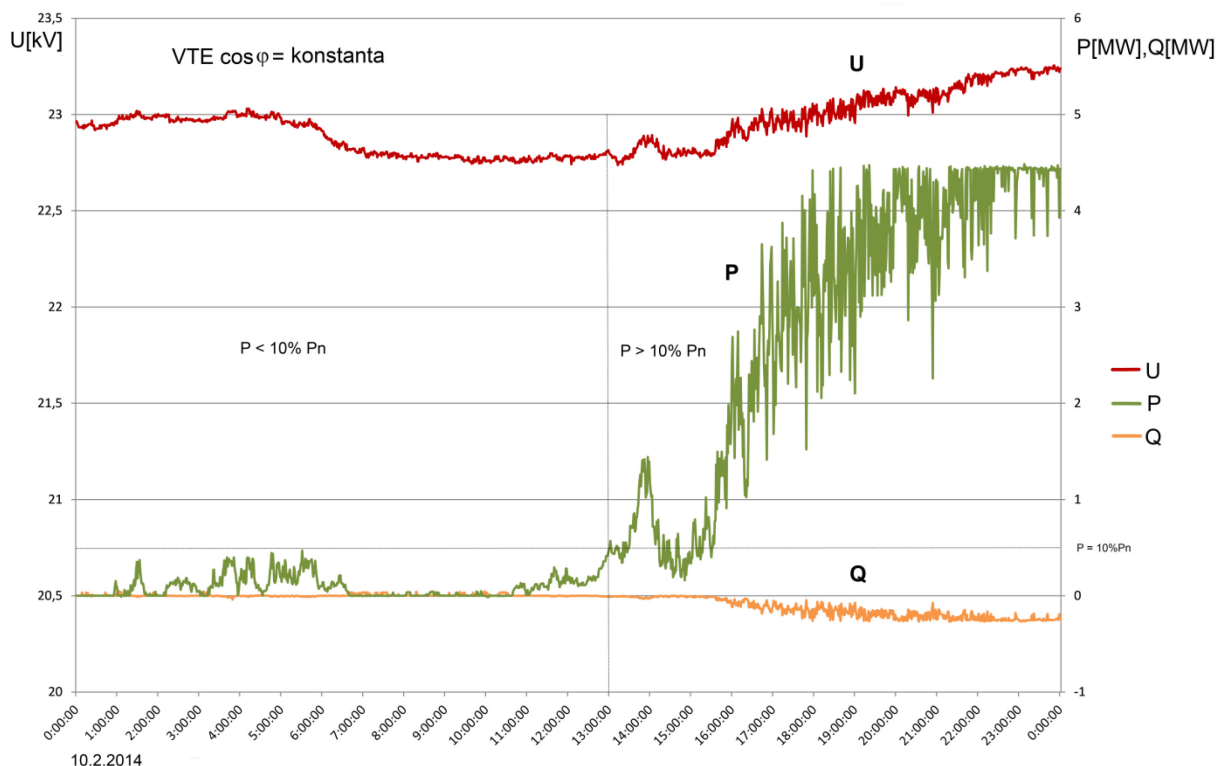
V případě, že ASRU přestane větrný park řídit, ponechá poslední zadanou hodnotu požadovaného napětí U.

## 9. Hodnocení napětí na základě provedených měření provozu VTE

### 9.1. Provoz VTE s $\cos \varphi = \text{konstanta}$

Je hodnocen vzorek měřených hodnot ze dne 10.2.2014. V grafu na obr. 12 jsou vyneseny průběhy sledovaných hodnot U, P, Q při provozu VTE v režimu předepsaného pásma účinníku v rozsahu  $\cos \varphi$  0,95-1, s odběrem Q [39].

V grafu je pro směr toku výkonu použita zdrojová orientace. Kladná hodnota P, Q značí dodávku sítě. Záporná hodnota P, Q značí odběr ze sítě. Pracovní bod se pohybuje ve II. kvadrantu.

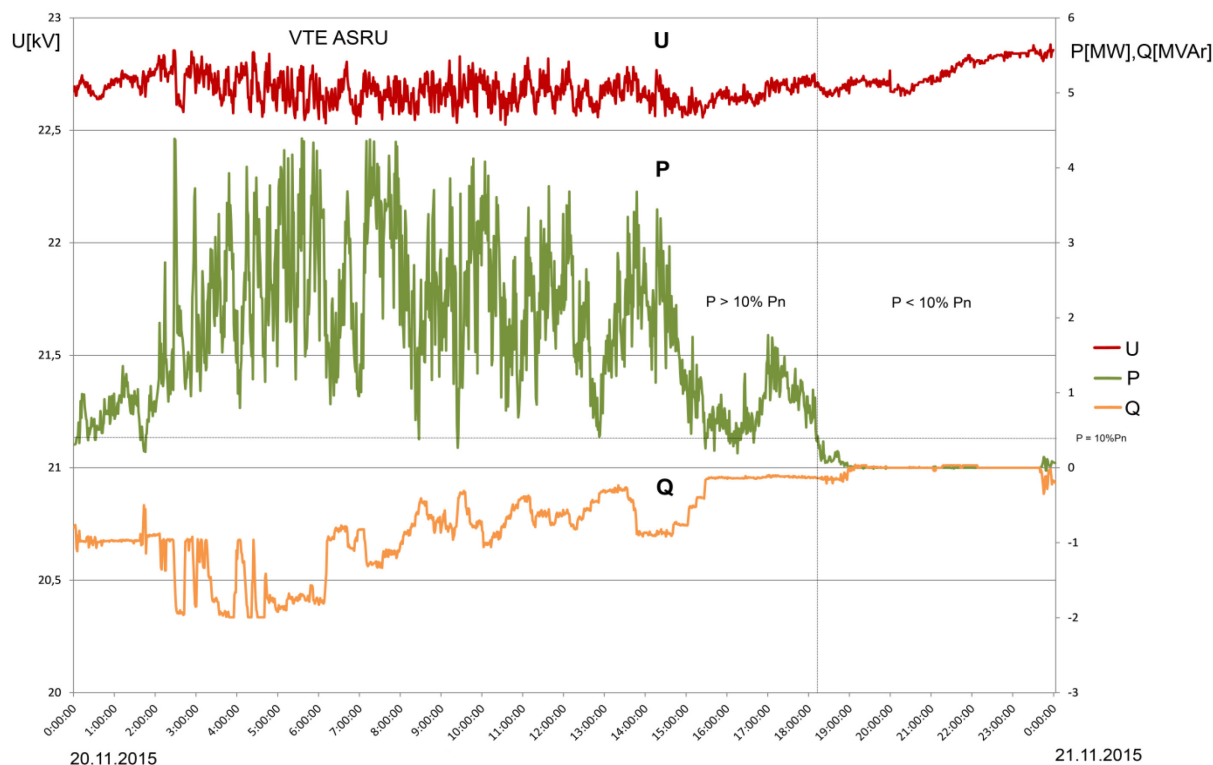


Obr. 12 Provoz VTE v režimu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$

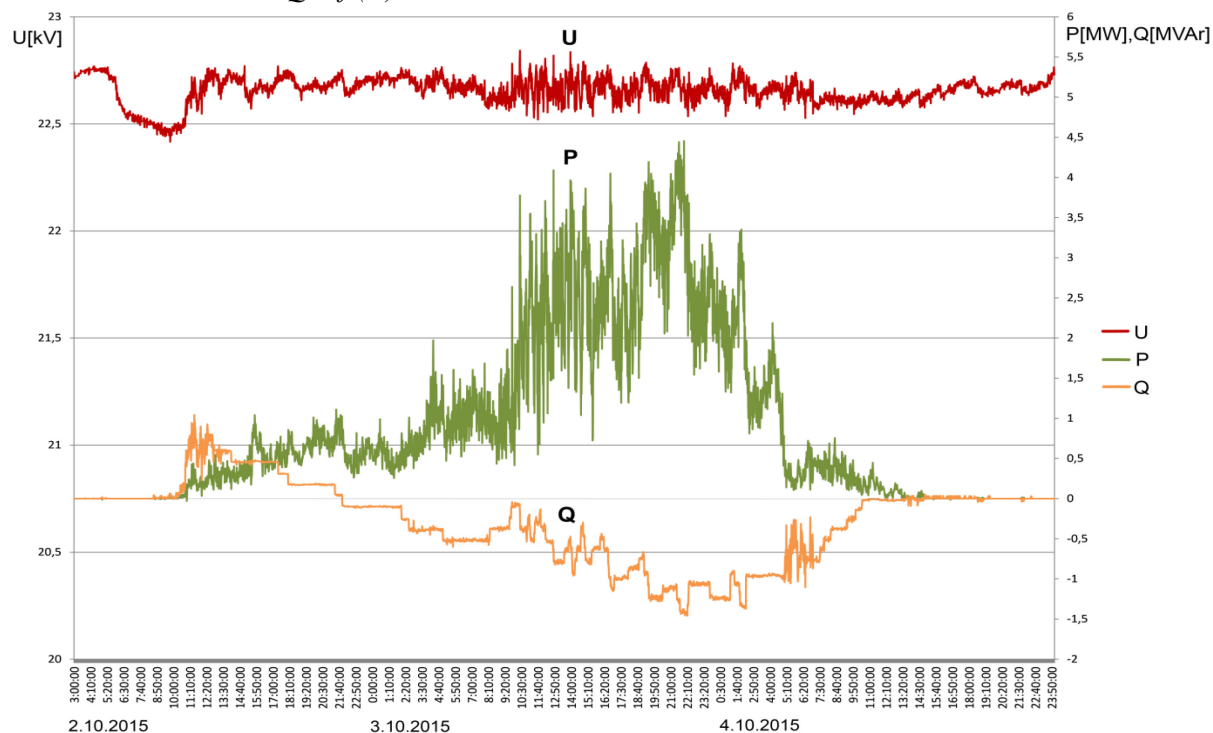
Z průběhů je vidět, že hodnota Q se mění jen minimálně a nepřispívá ke změně U. VTE odebírá Q ze sítě v souladu s předepsaným pracovním bodem ve II. kvadrantu. V čase (0 h – 13 h) bez výroby nebo s malou výrobou činného výkonu  $P < 10\% P_n$  (0,4 MW) je vliv VTE na hodnotu napětí minimální a hodnota napětí je odvislá od poměrů v síti. V nočních hodinách je síť odlehčená s vyšším napětím. V 6 hodin je již vidět pokles napětí s narůstajícími odběry ze sítě. V čase (13 h – 24 h) s výrobou činného výkonu  $P > 10\% P_n$  je vidět významné ovlivnění hodnoty U v předávacím místě. Rozdíl U je až 0,5 kV. Velikost U je ovlivněna jen činným výkonem. Jsou viditelné vzniklé napěťové skoky od rychlých změn P odvislé od povětrnostních podmínek.

## 9.2. Provoz VTE v režimu regulace $Q = f(U)$

Je hodnocen vzorek měřených hodnot z 20.11.2015 s podobným průběhem  $P$  jako předchozím vzorku na obr. 12. V grafu na obr. 13 a obr. 14 jsou vyneseny průběhy sledovaných hodnot  $U$ ,  $P$ ,  $Q$  při provozu VTE v režimu řízení  $Q = f(U)$  s regulací na konstantní napětí. ASRU reguluje na hodnotu  $U = 22,7$  kV. Pohyb pracovního bod je možný ve II. a III. kvadrantu, tedy s odběrem i dodávkou  $Q$  [39].



Obr. 13 Provoz VTE s  $Q = f(U)$  ve II. kvadrantu



Obr. 14 Provoz VTE s  $Q = f(U)$  ve II. a III. kvadrantu



Z průběhů je vidět, že hodnota  $Q$  se mění významně spolu s  $P$  a přispívá ke změně napětí. Ve vyhodnocovaném vzorku odebírá VTE  $Q$  ze sítě a ASRU reguluje hodnotu  $U$ . V čase (0 h – 19 h) s výrobou činného výkonu  $P > 0$  je vidět významné ovlivnění hodnoty  $U$  v předávacím místě a omezení rozsahu hodnot napětí v pásmu kolem požadované hodnoty. Odebíraný  $Q$  kompenzuje růst napětí. Hodnoty  $U$  se pohybují s rozptylem  $\pm 0,2$  kV kolem požadované hodnoty 22,7 kV. Napětíové skoky o velikosti 0,4 kV jsou dány přepnutím odbočky transformátoru v R 110/22 kV Hanušovice. V čase (19 h – 24 h) bez výroby činného výkonu  $P$  je vliv VTE na hodnotu  $U$  minimální a hodnota  $U$  je závislá na odběrech v síti. Od 21 h je vidět odlehčení sítě a pozvolný nárůst napětí.

### 9.3. Exploratorní analýza dat provozu VTE

#### 9.3.1. Provoz VTE v režimu $\cos \varphi = \text{konstanta}$

K posouzení jsou vybrána data ze dne 10.2.2014. Náhled na data výběrového souboru je v obrazové příloze na obr. 19. Průběh napětí je v grafu na obr. 12. Popis průběhu napětí je v odst. 9.1. V tabulce č. 1 jsou uvedeny statistické charakteristiky změny hodnoty napětí v intervalu za 24 hodin, v době bez výroby  $0 < P < 10 \% P_n$  a v době a s výrobou činného výkonu  $P > 10 \% P_n$ .

Statistika KGJ $\cos \varphi = \text{konstanta}$	$0 < P < P_n$	$0 < P < 10\%P_n$	$P > 10\%P_n$
minutové vzorky	$\Sigma 24h$	0 - 13	13 - 24
MIN [kV]	22,74	22,74	22,74
DOLNÍ KVARTIL [kV]	22,79	22,78	22,81
MEDIAN [kV]	22,95	22,85	23,02
HORNÍ KVARTIL [kV]	23,01	22,97	23,12
MAX [kV]	23,26	23,03	23,26
IQR [kV]	0,22	0,19	0,31
Modus [kV]	22,78	22,78	23,22
Variační rozpětí [kV]	0,52	0,29	0,52
Průměr [kV]	22,94	22,87	23,01
Rozptyl [ $kV^2$ ]	0,02	0,01	0,02
Výběrová směrodatná odchylka [kV]	0,14	0,10	0,15
Četnost	1440	776	664
Šikmost	0,46	0,11	-0,09
Špičatost	-0,78	-1,78	-1,25
Variační koeficient [%]	0,62	0,42	0,66
Outliers <sub>max</sub>	2,24	1,63	1,62
Outliers <sub>min</sub>	1,40	1,35	1,80

Tabulka 1 Statistické charakteristiky VTE  $\cos \varphi = \text{konstanta}$

- Median, Modus a Průměr – hodnoty proměnné nabývají různých hodnot v závislosti na velikosti  $P$
- Variační rozpětí – maximální hodnota rozdílu napětí je 0,52 kV
- Šikmost je blízka 0 a vypovídá o symetrickém rozložení hodnot kolem průměru
- Špičatost je  $< 0$  a vypovídá o mírně plošším rozdělení proměnné kolem průměru
- Variační koeficient je nízký ( $< 0,66 \%$ ) a vypovídá o malém rozptýlení hodnot kolem průměru. Vypovídá to o velké schopnosti průměru reprezentovat proměnnou



- Nejsou identifikovány žádné body umístěné ve větší vzdálenosti než 3násobek výběrové směrodatné odchylky od průměru. V datech nejsou přítomna odlehlá pozorování. Z charakteristik je patrné, že hodnoty mediánu a průměru jsou v jednotlivých posuzovaných úsecích srovnatelné [22]-[24], [34].

### 9.3.2. Provoz VTE v režimu regulace $Q = f(U)$ - ASRU

K posouzení jsou vybrána data ze dne 20.11.2015. Náhled na data výběrového souboru je v obrazové příloze na obr. 19. Průběh napětí je v grafu na obr. 13. Popis průběhu napětí je v odst. 9.2. V tabulce č. 2 jsou uvedeny statistické charakteristiky změny hodnoty napětí v intervalu za 24 hodin, v době bez výroby  $0 < P < 10 \% P_n$  a v době a s výrobou činného výkonu  $P > 10 \% P_n$ . Požadovaná hodnota  $U_{\Sigma} = 22,7 \text{ kV}$ .

Statistika VTE ASRU	$0 < P < P_n$	$0 < P < 10\%P_n$	$P > 10\%P_n$
minutové vzorky	$\Sigma 24h$	<b>19 - 24</b>	<b>0 - 19</b>
MIN [V]	22,53	22,60	22,53
DOLNÍ KVARTIL [V]	22,65	22,70	22,64
MEDIAN [V]	22,69	22,76	22,68
HORNÍ KVARTIL [V]	22,74	22,83	22,72
MAX [V]	22,95	22,95	22,84
IQR [V]	0,09	0,12	0,08
Modus [V]	22,68	22,84	22,68
Variační rozpětí	0,43	0,35	0,31
Průměr [V]	22,69	22,76	22,68
Rozptyl [ $V^2$ ]	0,01	0,01	0,00
Výběrová směrodatná odchylka [V]	0,07	0,07	0,06
Četnost	1440	299	1140
Šikmost	0,38	-0,26	0,12
Špičatost	-0,27	-1,09	-0,33
Variační koeficient [%]	0,31	0,32	0,26
Outliers <sub>max</sub>	3,62	2,58	2,70
Outliers <sub>min</sub>	2,40	2,13	2,59

Tabulka 2 Statistické charakteristiky VTE ASRU

- Medián, Modus a Průměr – hodnoty proměnné jsou v jednotlivých sledovaných intervalech velmi blízké, téměř se shodují
- Variační rozpětí – maximální hodnota rozdílu napětí je 0,43 kV
- Šikmost je blízká 0 a vypovídá o symetrickém rozložení hodnot kolem průměru
- Špičatost je  $< 0$  a vypovídá o mírně plošším rozdělení proměnné kolem průměru
- Variační koeficient je nízký ( $< 0,32 \%$ ) a vypovídá o malém rozptýlení hodnot kolem průměru. Vypovídá to o velké schopnosti průměru reprezentovat proměnnou
- Nejsou identifikovány žádné body umístěné ve větší vzdálenosti než 3násobek výběrové směrodatné odchylky od průměru. V datech nejsou přítomna odlehlá pozorování. Z charakteristik je patrné, že hodnoty mediánu a průměru jsou v jednotlivých posuzovaných úsecích srovnatelné [22]-[24], [34].

### **9.3.3. Vyhodnocení statistických charakteristik VTE Kopřivná při provozu $\cos \varphi = \text{konstanta}$ a regulace $Q = f(U)$**

Ve sledovaných parametrech statistických charakteristik nejsou výrazné rozdíly. Z vyhodnocení statistických charakteristik přesto vyplývá trend zlepšení parametrů dosažených napětí při funkční regulaci ASRU směrem k žádané hodnotě napětí.

#### **Variační rozpětí**

Statistické charakteristiky [22]-[24], [34] potvrzují, že při provozu VTE s výrobou P a s funkční regulací ASRU (1. a 3. sloupec) je dosaženo menší hodnoty variačního rozpětí (rozdíl maximální a minimální hodnoty napětí) - 0,43 kV, 0,31 kV proti hodnotám při provozu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  - 0,52 kV, 0,52 kV.

#### **Variační koeficient**

Podobně je při provozu VTE s výrobou P a s funkční regulací ASRU (1. a 3. sloupec) dosaženo menší hodnoty variačního koeficientu (procento průměru, který představuje směrodatná odchylka) – 0,31 %, 0,26 % proti hodnotám při provozu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  0,62 %, 0,66 %.

#### **Průměr**

Hodnota průměru napětí při provozu VTE s výrobou P a s funkční regulací ASRU dosahuje průměrné hodnoty 22,69 kV, 22,68 kV a je velmi blízká žádané hodnotě napětí 22,7 kV.

Hodnota průměru napětí při provozu VTE bez výroby P a s funkční regulací ASRU dosahuje průměrné hodnoty 22,76 kV a od žádané hodnoty 22,7 kV se již vzdaluje. Důvodem je, že v době bez výroby P není k dispozici regulační výkon Q.

Hodnota průměru napětí při provozu VTE s výrobou P při provozu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  dosahuje různých průměrných hodnot 22,94 kV, 23,01 kV. Výsledné napětí je dáno vlivem výroby P a odběry na VN lince.

Ve zkoumaném vzorku dat splňují dosažené hodnoty požadované parametry kvality napětí dle normy dle ČSN EN 50160 - Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí [6].

## 10. Kogenerační jednotky a výroba elektřiny z KGJ

Další zprovozněná aplikace regulace  $Q = f(U)$  řízené ASRU, kterou jsem vybral jako velmi vhodnou pro instalaci regulace  $Q/U$  za účelem prokázání přínosu regulace za účelem zpevnění napětí v místě připojení je na instalaci kogenerační jednotky firmy Tedom s typovým označením Quanto D1200 v lokalitě Moravský Beroun.

Kogenerací se označuje výroba dvou forem energie z jednoho druhu primárního paliva. Kogenerační jednotkou nazýváme technologická zařízení určená ke společné výrobě a tepelné a elektrické energie. Technologie obsahuje spalovací motor a elektrický generátor. Součástí KGJ je soustava tepelných výměníků, zajišťujících chlazení motoru a předávání tepla k dalšímu využití. Řídící jednotka KGJ zajišťuje řízení a regulaci chodu celého soustrojí. Za účelem sledování stavu a řízení KGJ na dálku dispečinkem komunikuje ŘJ prostřednictvím mobilní sítě či internetu [17].

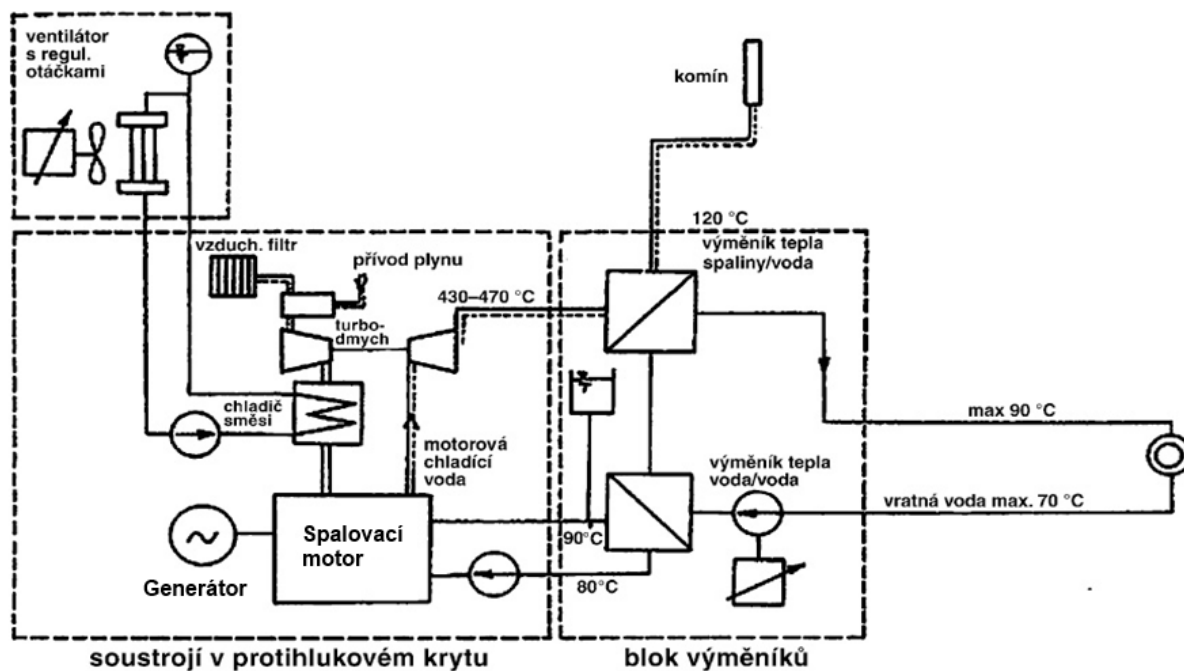
Primárním palivem pro KGJ je zemní plyn, bioplyn, skládkový plyn či kalový plyn.

### 10.1. Princip kogenerace se spalovacím motorem

Spalovací motor je využit jako tepelný stroj. Spalovací motor pohání elektrický generátor a zároveň produkuje odpadní teplo. Vzniklé teplo se odebrává ze spalin výfukových plynů, chlazením motoru a chlazením mazacího oleje. Chlazení oleje je prováděno vodním chladicím okruhem. Využití odpadního tepla z motoru zajišťují tepelné výměníky [30].

Odpadní teplo se využívá pro vytápění a přípravu teplé vody. KGJ je vhodná pro výrobu elektřiny pro vlastní spotřebu v nemocnicích, hotelích, bazénech, školách, menších průmyslových výrobnách, zemědělských podnicích, čističkách odpadních vod apod.

Základní princip kogenerační jednotky je zřejmý z obr. 15.



Obr. 15 Princip kogenerační jednotky

## 10.2. Aplikace regulace ASRU v lokalitě Moravský Beroun

V lokalitě Moravský Beroun je v areálu společnosti Granitol instalována kogenerační jednotka firmy Tedom v kontejnerovém provedení s typovým označením Quanto D1200 [31]. Instalovaný synchronní generátor má jmenovitý činný výkon 999 kW. Výrobní je připojena samostatným vedením ve vzdálenosti 14 km od R 110/22 kV Šternberk.

## 10.3. Parametry synchronního generátoru Marelli

KGJ fy Tedom řady Quanto 1200D využívají dvouložiskový 3fázový synchronní generátor Marelli MJB LA4. Parametry synchronního generátoru: jmenovitý výkon  $P_n$  999 kW,  $S_n$  – 1150 kVA, frekvence 50 Hz, 4pólový stroj, jmenovité otáčky 1500 ot/min, napětí generátoru  $U_n$  – 400 V, jmenovitý proud  $I_n$  – 1802 A, rozsah účinníku  $\cos \varphi$  0,87L – 0,87C, maximální hodnota jalového výkonu  $Q_{\max}$  – 566 kVAr dodávka/odběr [32].

## 10.4. PQ diagram synchronního generátoru KGJ

### Provozní diagram

Základní provozní PQ diagram synchronního stroje na obr. 5 je grafem závislosti činného a jalového výkonu synchronního generátoru na jeho napěťových a proudových hodnotách. Provozní stav stroje je charakterizován aktuálním pracovním bodem v tomto diagramu [19]. Provozní diagram je charakterizován:

- omezení maximálním budicím proudem - rotorový proud nesmí s ohledem na maximální teplotu vinutí rotoru daného normou překročit zadanou hodnotu
- omezení maximálním proudem statoru - statorový proud nesmí s ohledem na maximální teplotu vinutí statoru daného normou překročit určitou hodnotu
- omezení magnetickým polem v čelním prostoru - omezení souvisí s rozptylovým magnetickým polem čelních částí vinutí statoru a rotoru, které vstupuje v axiálním směru do jádra statoru a přitom indukuje v masivních konstrukčních částech vířivé proudy, které tyto části zahřívají
- omezení statickou stabilitou - po překročení meze statické stability vypadne stroj ze synchronizmu. Velikost momentu je přímo úměrná sinu zátěžného úhlu, tj. úhlu mezi výsledným magnetickým tokem stroje a budicím polem rotoru.

## 10.5. Řízení napětí a jalového výkonu synchronního generátoru

Synchronní generátor poskytuje široký rozsah jalového výkonu. Tento jalový výkon je k dispozici síti jako vysoce dynamická služba. Řízení Q je umožňuje udržet stabilitu napětí v síti. Při regulaci napětí je fázový úhel generátoru řízen charakteristikou  $Q = f(U)$  podle rozdílu skutečného a požadovaného napětí. Napětí v napájecím místě je zvyšováno nebo snižováno v závislosti na provozní charakteristice stroje.

Při zkušebním provozu KGJ Granitol byla na základě místních podmínek s PDS konzultována úprava a optimalizace standardní charakteristiky pro využití ASRU. Rozsah maximálního jalového výkonu ( $Q_{\max}$  a  $-Q_{\max}$ ) byl omezen na 350 kVAr. Při jmenovitém  $P_n$  je poměr  $Q/P_n = 0,35$ , což odpovídá účinníku  $\cos \varphi$  0,95. Pro vyloučení zbytečné regulace je pásmo necitlivosti nastaveno  $\pm 0,5 \% U$  ( $\pm 0,11$  kV).

Po provedení zkoušek byl rozsah maximálního jalového výkonu ( $Q_{\max}$  a  $-Q_{\max}$ ) rozšířen na 480 kVAr. Při jmenovitém  $P_n$  je poměr  $Q/P = 0,48$ , což odpovídá účinníku  $\cos \varphi$  0,90.

Princip regulace je stejný jako na obr. 10.

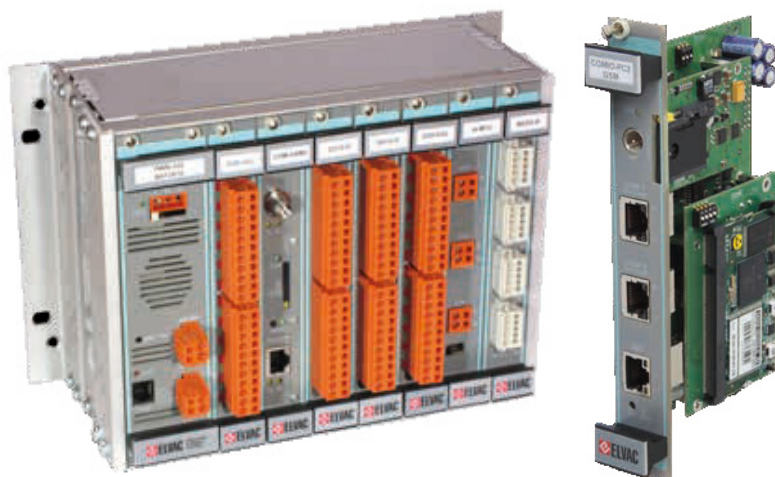
Synchronní generátor v přebuzeném stavu dodává jalový výkon do sítě. Při provozu v podbuzeném stavu synchronní generátor jalový výkon ze sítě odebírá.

#### 10.6. Aplikace ASRU na KGJ 999 kW Granitol Moravský Beroun

Jedná se o modulární řídicí jednotku, která je primárně určena pro řízení a sběr dat v distribučních sítích elektrické energie. Vyznačuje se malou zástavnou hloubkou pro snadnou montáž do stávajících rozvaděčů. Na obr. 16 je uveden systém skládající se z modulů v podobě zásuvných karet.

Pro komunikaci výroby s dispečinkem slouží instalované zařízení RTU7M umístěné v části rozvodny vn. Obsahuje jednotku dálkové komunikace s dispečinkem PDS, převodníky elektrických veličin, zdroj zajištěného napájení, pomocná relé (pro ovládání přívodního vypínače). Komunikace RTU7 s dispečinkem je prováděna přes GPRS protokolem IEC 60870-5-104 [17], [29].

Samotná regulace ASRU je v RTU7 zajištěna modulem COMIO-PC [29]. Karta je vybavena komunikačním rozhraním a nabízí širší možnosti využití: obhospodaření většího množství podřízených jednotek, implementace dalších standardních i speciálních protokolů apod. Kromě komunikačních funkcí lze tuto kartu využívat také jako převodník komunikace a komunikační koncentrátor.



Obr. 16 RTU7M – modulové provedení, Karta COMIO-PC

Instalovaná regulace ASRU reguluje na požadovanou hodnotu napětí na hladině vn. Algoritmus v kartě COMIO-PC počítá hodnotu rozdílu  $\Delta U = U_{\text{žádané}} - U_{\text{měřené}}$  a spolu s hodnotou spočteného  $\cos \varphi$  ji předává po sběrnici RS485 MODBUS-RTU řídicímu systému KGJ v rozvaděči R-DS. ŘS dále přepočítává rozdíl napětí přes  $\cos \varphi$  na potřebný příspěvek jalového výkonu synchronním generátorem Marelli MJB LA4. ŘS vyhodnocuje potřebu regulace ve skocích  $\Delta \cos \varphi = \text{cca } 0,005$ . Ve výsledku není regulace Q spojitá, ale Q se podle změny  $\cos \varphi$  mění v hladinách. Pro požadavky regulace  $Q = f(U)$  je uvedený přepočet změny  $\Delta Q$  na změnu  $\Delta \cos \varphi$  použitelný.

ASRU udržuje napětí až do vyčerpání rezervy jalového výkonu  $Q_{\text{max}}$ . Požadovaná hodnota U je zadána PDS na hodnotě 22,45 kV s tolerancí 0,11 kV, tedy 0,5 %  $U_n$ .

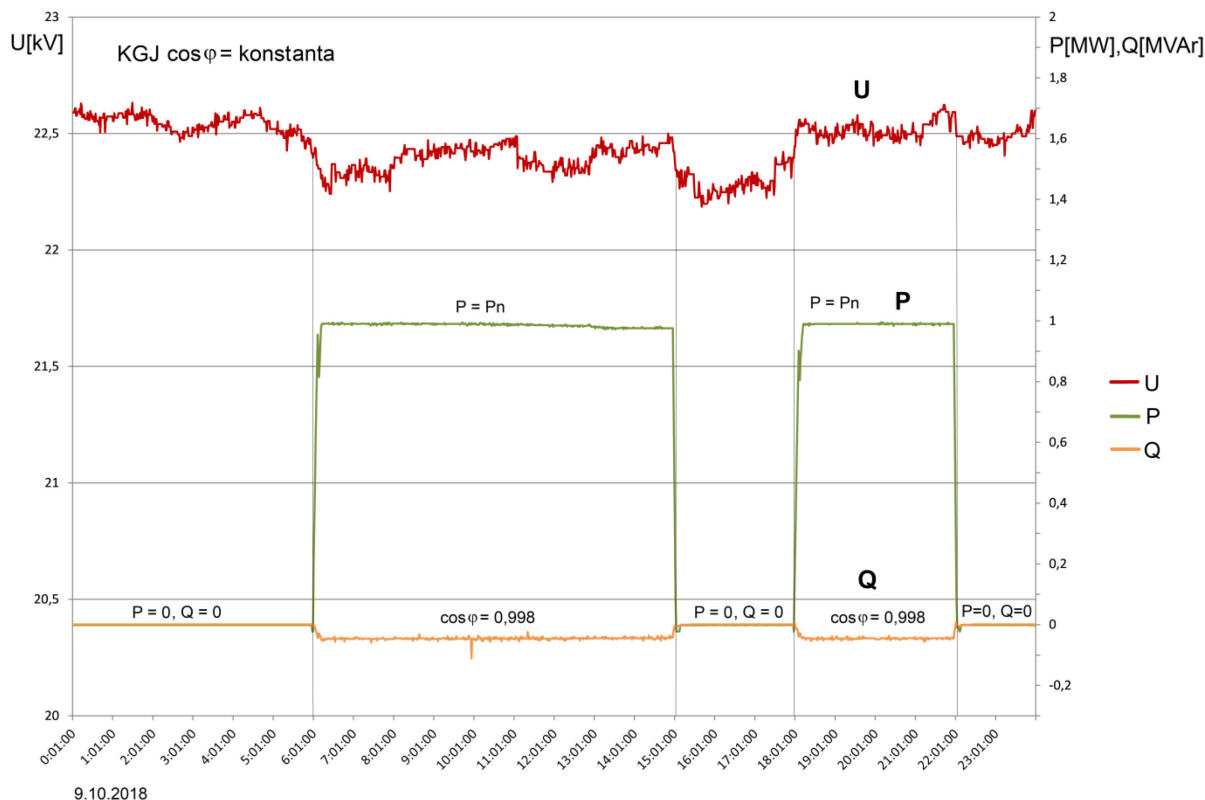
V případě, že ASRU přestane řídit KGJ výrobu, ponechá poslední zadanou hodnotu požadovaného napětí U.

## 11. Hodnocení napětí na základě provedených měření provozu KGJ

### 11.1. Provoz KGJ s $\cos \varphi = \text{konstanta}$

Je hodnocen vzorek měřených hodnot ze dne 9.10.2018. V grafu na obr. 17 jsou vyneseny průběhy sledovaných hodnot  $U$ ,  $P$ ,  $Q$  při provozu KGJ v režimu předepsaného pásma účinniku v rozsahu  $\cos \varphi 0,95-1$ , s odběrem  $Q$ .

V grafu je pro směr toku výkonu použita zdrojová orientace. Kladná hodnota  $P$ ,  $Q$  značí dodávku sítě. Záporná hodnota  $P$ ,  $Q$  značí odběr ze sítě. Pracovní bod se pohybuje ve II. kvadrantu.



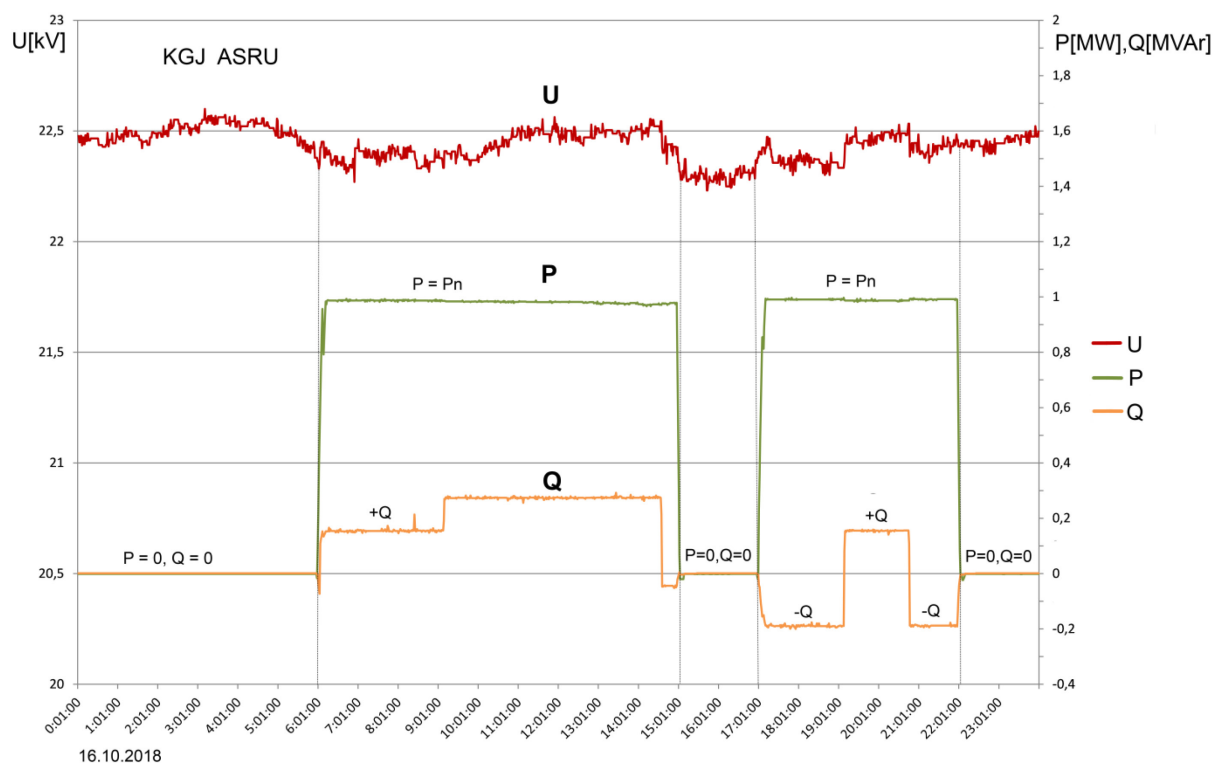
Obr. 17 Provoz KGJ v režimu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$

Z průběhů je opět vidět, že hodnota  $Q$  se mění jen minimálně a nepřispívá ke změně  $U$ . KGJ odebírá  $Q$  ze sítě v souladu s předepsaným pracovním bodem ve II. kvadrantu. V čase bez výroby je hodnota napětí závislá jen na poměrech v síti. V nočních hodinách je síť odlehčená s vyšším napětím. Před 6. hodinou je zřetelný pokles napětí, který souvisí s odběrem ze sítě a přípravou denní směny samotného podniku Granitol s rezervovaným příkonem 2400 kW. V době s výrobou KGJ (6 h – 15 h, 18 h – 22 h) přispívá  $P$  k navýšení napětí. V okamžiku náběhu KGJ (6 h, 18 h) je zřetelný nárůst napětí. Podobně v okamžiku zastavení KGJ (15 h, 22 h) je zřetelný pokles napětí. Protože KGJ vyrábí stálou konstantní hodnotu  $P$  999 kW, jsou další změny napětí při provozu KGJ dány poměry v síti a změnou odebíraného příkonu v podniku Granitol.

### 11.2. Provoz KGJ v režimu regulace $Q = f(U)$

Je hodnocen vzorek měřených hodnot z 16.10.2018 s podobným průběhem  $P$  a  $U$  jako předchozím vzorku na obr. 17. V grafu na obr. 18 jsou vyneseny průběhy sledovaných hodnot  $U$ ,  $P$ ,  $Q$  při provozu

KGJ v režimu řízení  $Q = f(U)$  s regulací na konstantní napětí. ASRU reguluje na hodnotu  $U - 22,45 \text{ kV}$ . Pohyb pracovního bod je možný ve II. a III. kvadrantu, tedy s odběrem i dodávkou  $Q$ .



Obr. 18 Provoz KGJ s  $Q = f(U)$  ve II. a III. kvadrantu

Z průběhů je vidět, že hodnota  $Q$  se mění významně a přispívá ke změně napětí. Ve vyhodnocovaném vzorku podle potřeby regulace KGJ dodává nebo odebírá  $Q$  a ve výsledku ASRU reguluje hodnotu  $U$ . Opět je vidět navýšení hodnoty  $U$  v době provozu KGJ s výrobou  $P$ . V okamžiku náběhu KGJ (6 h, 17 h) je zřetelný nárůst napětí. Podobně v okamžiku zastavení KGJ (15 h, 22 h) je zřetelný pokles napětí. Konstantní hodnota  $P$  999 kW přispívá k navýšení hodnoty napětí, která je kompenzována poměry v síti a změnou odebíraného příkonu při provozu podniku. Velikost změny  $Q$  je podle grafu stupňovitá. Byly zjištěny skoky  $Q$  po 50 kVar. Vlivem nespojité regulace  $Q$  je výsledný kolísavý průběh napětí ovlivněn změnami odebíraného příkonu v podniku. Regulační zásahy regulace ASRU nastávají pouze při překročení pásma necitlivosti. V době provozu generátoru (6 h – 22 h) jsou na průběhu napětí viditelné změny související s výrobou  $P$ , odběrem a dodávkou  $Q$ . Zejména jsou zřetelné úseky změny napětí související s přibuzením či odbuzením stroje.

Posouzení měřených průběhů  $P$ ,  $Q$ ,  $U$  potvrzuje funkčnost regulace ASRU. Při vyhodnocení překročení rozsahu odchylky napětí mimo toleranční pásmo vyvolá regulátor potřebnou změnu jalového výkonu. Výsledkem je ovlivnění napětí směrem k žádané hodnotě. Sled regulačních zásahů zajišťuje vyrovnaní provozní hodnoty napětí v regulovaném uzlu.

Odebíraný  $Q$  kompenzuje růst napětí. Hodnoty  $U$  se pohybují s rozptylem  $\pm 0,2 \text{ kV}$  kolem požadované hodnoty 22,45 kV. V čase bez výroby činného výkonu  $P$  (15 h – 17 h) je síť zatížena a hodnota  $U$  je ovlivněna jen odběrem podniku. Od 22 h je vidět odlehčení sítě a pozvolný nárůst napětí.

### 11.3. Exploratorní analýza dat provozu KGJ

#### 11.3.1. Provoz KGJ v režimu $\cos \varphi = \text{konstanta}$

K posouzení jsou vybrána data ze dne 9.10.2018. Náhled na data výběrového souboru je v obrazové příloze na obr. 19. Průběh napětí je v grafu na obr. 17. Popis průběhu napětí je v odst. 11.1. V tabulce č. 3 jsou uvedeny statistické charakteristiky změny hodnoty napětí v intervalu za 24 hodin s výkonem  $0 < P < P_n$ , v době bez výroby  $P = 0$  a v době s výrobou činného výkonu  $P = P_n$ .

Statistika KGJ $\cos \varphi = \text{konstanta}$	$0 < P < P_n$	$P = 0$	$P = P_n$
minutové vzorky	$\Sigma 24h$	0-6,15-18,22-24	6-15,18-22
MIN [kV]	22,19	22,19	22,24
DOLNÍ KVARTIL [kV]	22,38	22,38	22,38
MEDIAN [kV]	22,46	22,50	22,43
HORNÍ KVARTIL [kV]	22,52	22,56	22,49
MAX [kV]	22,63	22,63	22,62
IQR [kV]	0,14	0,18	0,11
Modus [kV]	22,49	22,49	22,43
Variační rozpětí [kV]	0,45	0,45	0,38
Průměr [kV]	22,45	22,46	22,43
Rozptyl [ $kV^2$ ]	0,010	0,014	0,006
Výběrová směrodatná odchylka [kV]	0,098	0,117	0,075
Četnost	1440	660	780
Šikmost	-0,45	-0,86	0,05
Špičatost	-0,61	-0,60	-0,49
Variační koeficient [%]	0,44	0,52	0,34
Outliers <sub>max</sub>	1,89	1,44	2,52
Outliers <sub>min</sub>	2,67	2,39	2,54

Tabulka 3 Statistické charakteristiky KGJ  $\cos \varphi = \text{konstanta}$

- Median, Modus a Průměr – v 1. a 2. sloupci nabývají hodnoty proměnné různých hodnot v závislosti na velikosti P
- Medián, Modus a Průměr – ve 3. Sloupci jsou hodnoty proměnné shodné
- Variační rozpětí – maximální hodnota rozdílu napětí je 0,45 kV
- Šikmost blízká 0 vypovídá o symetrickém rozložení hodnot kolem průměru. Záporná hodnota šikmosti vypovídá o rozložení nadpoloviční většiny dat nad průměrem.
- Špičatost je  $< 0$  a vypovídá o plochém rozdělení proměnné kolem průměru
- Variační koeficient je nízký ( $< 0,52\%$ ) a vypovídá o malém rozptýlení hodnot kolem průměru. Vypovídá to o velké schopnosti průměru reprezentovat proměnnou
- Nejsou identifikovány žádné body umístěné ve větší vzdálenosti než 3násobek výběrové směrodatné odchylky od průměru. V datech nejsou přítomna odlehlá pozorování. Z charakteristik je patrné, že hodnoty mediánu a průměru jsou v jednotlivých posuzovaných úsecích srovnatelné [22]-[24], [34].



### 11.3.2. Provoz KGJ v režimu regulace $Q = f(U)$ - ASRU

K posouzení jsou vybrána data ze dne 16.10.2018. Náhled na data výběrového souboru je v obrazové příloze na obr. 195. Průběh napětí je v grafu na obr. 18. Popis průběhu napětí je v odst. 11.2. V tabulce č. 4 jsou uvedeny statistické charakteristiky změny hodnoty napětí v intervalu za 24 hodin s výkonem  $0 < P < P_n$ , v době bez výroby  $P = 0$  a v době a s výrobou činného výkonu  $P = P_n$ . Požadovaná hodnota  $U_{\Sigma} = 22,45$  kV.

Statistika KGJ ASRU	$0 < P < P_n$	$P = 0$	$P = P_n$
minutové vzorky	$\Sigma$ 24h	0-6,15-17,22-24	6-15,17-22
MIN [kV]	22,23	22,23	22,27
DOLNÍ KVARTIL [kV]	22,39	22,43	22,38
MEDIAN [kV]	22,45	22,48	22,44
HORNÍ KVARTIL [kV]	22,49	22,51	22,48
MAX [kV]	22,60	22,60	22,56
IQR [kV]	0,10	0,08	0,10
Modus [kV]	22,52	22,53	22,43
Variační rozpětí [kV]	0,37	0,37	0,29
Průměr [kV]	22,44	22,46	22,45
Rozptyl [kV <sup>2</sup> ]	0,005	0,007	0,003
Výběrová směrodatná odchylka [kV]	0,071	0,085	0,057
Četnost	1440	600	840
Šikmost	-0,46	-0,86	0,01
Špičatost	-0,39	-0,24	-0,99
Variační koeficient [%]	0,32	0,38	0,26
Outliers <sub>max</sub>	2,31	1,79	2,36
Outliers <sub>min</sub>	2,89	2,54	2,75

Tabulka 4 Statistické charakteristiky KGJ ASRU

- Medián a Průměr – hodnoty proměnné jsou v jednotlivých sledovaných intervalech velmi blízké, téměř se shodují
- Variační rozpětí – maximální hodnota rozdílu napětí je 0,37 kV
- Šikmost blízká 0 vypovídá o symetrickém rozložení hodnot kolem průměru. Záporná hodnota šikmosti vypovídá o rozložení nadpoloviční většiny dat nad průměrem
- Špičatost je  $< 0$  a vypovídá o mírně plošším rozdělení proměnné kolem průměru
- Variační koeficient je nízký ( $< 0,38 \%$ ) a vypovídá o malém rozptýlení hodnot kolem průměru. Vypovídá to o velké schopnosti průměru reprezentovat proměnnou
- Nejsou identifikovány žádné body umístěné ve větší vzdálenosti než 3násobek výběrové směrodatné odchylky od průměru. V datech nejsou přítomna odlehlá pozorování. Z charakteristik je patrné, že hodnoty mediánu a průměru jsou v jednotlivých posuzovaných úsecích srovnatelné [22]-[24], [34].

### **11.3.3. Vyhodnocení statistických charakteristik KGJ Moravský Beroun při provozu $\cos \varphi = \text{konstanta}$ a regulace $Q = f(U)$**

Ve sledovaných parametrech statistických charakteristik nejsou výrazné rozdíly. Přesto z vyhodnocení statistických charakteristik vyplývá trend zlepšení parametrů dosažených napětí při funkční regulaci ASRU směrem k žádané hodnotě napětí.

#### **Variační rozpětí**

Statistické charakteristiky [22]-[24], [34] potvrzují zlepšení parametru variačního rozpětí. Při provozu KGJ s výrobou P a s funkční regulací ASRU (1. a 3. sloupec) je dosaženo menší hodnoty variačního rozpětí - 0,37 kV, 0,29 kV proti hodnotám při provozu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  - 0,45 kV, 0,38 kV.

#### **Variační koeficient**

Podobně je při provozu KGJ s výrobou P a s funkční regulací ASRU (1. a 3. sloupec) dosaženo menší hodnoty variačního koeficientu – 0,32 %, 0,26 % proti hodnotám při provozu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  0,44 %, 0,34 %.

#### **Průměr**

Dosažené hodnoty průměrného napětí jsou blízké žádané hodnotě napětí 22,45 kV při provozu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  i regulace  $Q = f(U)$ .

Hodnota průměru napětí při provozu KGJ s výrobou P (1. a 3. sloupec) a s funkční regulací ASRU dosahuje průměrné hodnoty 22,44 kV, 22,45 kV a je velmi blízká žádané hodnotě napětí.

Hodnota průměru napětí při provozu KGJ bez výroby P (2. sloupec) s regulací ASRU dosahuje průměrné hodnoty 22,46 kV a je velmi blízká žádané hodnotě napětí.

Hodnota průměru napětí při provozu KGJ (1. a 3. sloupec) s výrobou P při provozu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  dosahuje průměrných hodnot 22,45 kV, 22,43 kV, což jsou hodnoty blízké žádané hodnotě napětí.

Ve zkoumaném vzorku dat splňují dosažené hodnoty požadované parametry kvality napětí dle normy dle ČSN EN 50160 - Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí [6].

Napětí v místě výroby je ovlivněno blízkostí rozvodny, která se svým zkratovým výkonem představuje tvrdý zdroj napětí. V místě připojení výroby je uzel s nízkým koeficientem citlivosti a změna jalového výkonu se projeví malým příspěvkem ke změně napětí. Výsledné napětí více kopíruje průběh napětí na rozvodně, vlivem výroby je ovlivněno jen málo.

## 12. Výhody regulace napětí ASRU

### **Z výsledku měření mohou učinit následující dílčí závěry:**

- Regulace napětí ASRU umožňuje eliminovat vznikající problémy spojené s rozsáhlým připojováním nových zdrojů, jako jsou fluktuace napětí nebo nevhodná změna ustálených jalových toků v soustavě.
- Výsledná stabilizace napětí v soustavě zvyšuje kvalitu dodávky elektřiny konečnému zákazníkovi.
- Regulace napětí průběžně vyhodnocuje stav napětí v síti a umožňuje využít regulační jalový výkon pracujících generátorů k optimalizaci toku jalového výkonu a tím stabilizaci napěťových poměrů v síti.
- Výrobní pracující v regulaci napětí dodává podle svých možností do soustavy právě potřebné množství jalového výkonu, které soustava aktuálně potřebuje a neomezuje výrobu činného výkonu.
- Regulace automaticky reaguje na změny napětí v síti způsobené změnami v provozu soustavy např. změny odběrů, výpadky vedení, odlehčení vedení a změny na odbočkách transformátorů.
- Řízení jalového výkonu pro regulaci ASRU je spojené s reálnou potřebou soustavy a může znamenat i menší potřebu jalového výkonu v regulované soustavě.
- Omezením toků jalového výkonu z jiných částí soustavy je možné snížit ztráty v soustavě.
- Regulace napětí umožňuje omezit počet regulačních zásahů na odbočkách transformátorů 110 kV/vn.
- Při ztrátě komunikace dálkového řízení z dispečinku reguluje ASRU autonomně na poslední známou zadanou hodnotu.
- Plná automatizace – systém ASRU kromě zapnutí a vypnutí nevyžaduje ovládání pracovníka dispečinku

### **Mezi hlavní vypořizované benefity regulace ASRU patří:**

- **Zvýšení bezpečnosti a hospodárnosti provozu soustavy.** Regulace U a Q využitím dostupného regulačního jalového výkonu výroben předchází napěťové nestabilitě soustavy, efektivně eliminuje nežádoucí přenos jalového výkonu a snižuje technické ztráty v DS.
- **Zvýšení kvality dodávky elektřiny odběratelům.** Regulace U a Q průběžně vyrovnává bilanci jalového výkonu v regulovaných pilotních uzlech a tím stabilizuje napětí v DS.
- **Zvýšení možnosti připojování nových výroben oproti stávajícímu stavu.** Regulace U a Q eliminuje negativní působení OZE s nahodilou výrobou činného výkonu na regulovanou soustavu. ASRU umožňuje zapojení větrných a fotovoltaických výroben do regulace. Příznivě ovlivňuje negativní vliv na změny napětí v DS.
- **Snížení počtu regulací odboček na transformátorech.** Regulace U a Q eliminuje vzniklé napěťové změny v regulované soustavě. Snižuje množství regulačních změn odboček transformátorů, což přispívá ke zvýšení jejich životnosti.
- **Snížení nároku na dispečerské řízení regulované DS.** Regulace U a Q je plně automatický regulační proces, který vyžaduje minimální součinnost dispečera.
- **OZE stabilizuje napětí.** Ve vzdálených lokalitách od napájecí rozvodny, kde je napětí měkké, bylo vypořizováno stabilnější napětí, když se VTE točí, než když vítr nefouká.

### 13. Doporučení pravidel regulace $Q = f(U)$ pro metodické postupy PDS

Na základě vyhodnocení měření a zkušeností z provozované regulace  $U / Q$  na jednotlivých výrobnách navrhuji následující doporučení pro zpracování metodických postupů pro pravidla provozu regulace ASRU mezi PDS a výrobcem.

- Automatická sekundární regulace na zadané napětí ASRU je popsána funkcí  $Q = f(U)$ .  
V metodických postupech doporučuji sjednotit definici a popis regulace ASRU, včetně zkráceného popisu -  $U/Q$ , případně  $U(Q)$  a to za účelem odlišení od autonomní regulace  $Q$  definované v Příloze č.4 PPDS, označované  $Q(U)$ .
- Požadovaná hodnota napětí, na kterou má výrobná regulovat, je výrobně zadávána domluveným přenosem z dispečinku. Výrobná reguluje jalový výkon na základě rozdílu mezi požadovanou hodnotou napětí a aktuálně měřenou hodnotou napětí v místě tak, aby byl minimalizován rozdíl mezi hodnotami napětí.
- Z grafů jsem vypočítával zřetelný vliv  $U/Q$  regulace i při nízké výrobě činného výkonu. Doporučuji vyžadovat funkční regulaci při výrobě činného výkonu výrobní minimálně od hodnoty  $P > 10 \% S_n$ .
- Výrobci doporučuji stanovit redukovaný provozní diagram generátoru a s PDS domluvit meze regulační rezervy  $Q$ . V přepočtu na  $\cos \varphi$  je požadovanou mezí 0,9 induktivní nebo 0,9 kapacitní.
- Dosáhne-li výrobná meze domluveného rozsahu regulace ( $\cos \varphi$  0,9 ind nebo 0,9 kap) a stále není dosaženo zadané požadované hodnoty napětí, doporučuji nevyhodnocovat to jako chybu regulace. Jde o dosažení domluvených limitů jalového výkonu generátoru.
- Výrobná musí být schopná reagovat na zadané změny požadované hodnoty napětí v maximálním čase do 1 minuty.
- V případě ztráty komunikace mezi dispečinkem a výrobnou bude  $U/Q$  regulace výrobní zajišťovat regulaci na poslední známou požadovanou hodnotu napětí.
- Na hladině vn je vyžadována přesnost regulace  $\pm 0,5 \%$  z  $U_n$ , tj. 110 V na 22 kV. Dle mého názoru by bylo dostačující  $\pm 1\%$  a stále by se zdroji regulovalo uvnitř necitlivosti HRT  $\pm 1,5\%$ .

## 14. Závěr

Na základě výsledků měření a zkušeností z provozu ASRU na uvedených výrobních VTE v lokalitě Kopřivná a KGJ v lokalitě Moravský Beroun mohou definovat doporučení pro metodiku návrhu a stanovení podmínek pro instalace ASRU v sítích PDS, kterou jsem uvedl v bodě 13.

Pro stanovení připojitelného výkonu výroben je možné zvážit při nasazení regulace Q/U změnu metodiky výpočtu stanovenou v Příloze č.4 PPDS. Ve výpočetním modelu je pro základní provozní stav vedení a posuzovanou změnu  $\Delta U < 2 \%$  možné zadat hodnotu indukčního účinníku v rozmezí  $\cos \varphi 0,95 - 0,90$ .

Využití regulace napětí v síti VN se nabízí jako potenciál pro efektivní eliminaci vlivu disperzních OZE s výrobou činného výkonu závislou na povětrnostních a slunečních podmínkách.

Spolu s možnostmi pro stabilizaci změn U v síti vyvstávají nová témata a otázky, a to z pohledu dispečerského řízení, nutných investic do požadované technologie a samozřejmě opory v legislativě.

Nabízí se možnost nasazení regulace napětí a jalového výkonu ve Smart Grids sítích.

Zařízení výroby musí být s ohledem na možné ztráty uvnitř zařízení výrobce dimenzováno na přenos potřebného jalového výkonu. Náklady hradí výrobce.

Výsledkem regulace napětí s využitím disperzních zdrojů je stabilizace napětí v soustavě a přináší výhodu pro PDS a konečného spotřebitele.

Zvyšující se objem připojených OZE vede k nově vznikajícím úlohám při řízení sítí. Využití jalového výkonu za účelem řízení napětí a v důsledku provozování stabilnější soustavy se promítá ve změně evropské energetické legislativy a navazující harmonizované národní legislativy definující podmínky pro připojení na celoevropském společném základu.

Výsledky mého měření a zkušenosti z provozu ASRU na prezentované VTE Kopřivná a KGJ Moravský Beroun ukazují, že provoz výroby v režimu řízení jalového výkonu s vhodně nastavenými parametry regulace  $Q = f(U)$  umožňuje PDS účinně a efektivně řídit napětí v síti. Výsledkem je optimalizace rovnovážného stavu napětí v rámci požadovaných provozních mezí. Synchronní generátory prokázaly poskytnutí širokého rozsahu Q. Tento Q je k dispozici síti jako dynamická podpůrná služba. V dalším provozu výroby doporučuji rozšířit pásmo necitlivosti například na  $\pm 1 \%$  a omezit tak počet regulačních zásahů. Aby bylo možné přizpůsobit schopnosti regulace je nezbytná úzká spolupráce mezi zástupci PDS a provozovateli výroby.

Výsledky mého zkoumání potvrzují vhodnost a přizpůsobivost VTE s technologií synchronního generátoru Enercon při začlenění do regulace Q za účelem efektivní eliminace vlivu kolísání napětí způsobeného proměnlivou výrobou.

Podobně je pro regulaci Q vhodná technologie synchronního generátoru poháněná spalovacím motorem. Rozdíl je vidět jen v charakteru stálé výroby činného výkonu s menší potřebou regulačních zásahů.

Nastavená požadovaná doba reakce regulace na vyžádanou změnu nově požadované hodnoty napětí v maximální době do 1minuty se jeví jako dostatečně rychlá a vyhovující. Ve výsledcích měření se při regulaci U/Q na hladině významně neprojevovaly regulační zásahy v nadřazené síti VVN za účelem

ovlivnění napětí na hladině VN. Parametry regulace ASRU prokazují dostatečnou dynamiku pro regulaci Q/U na hladině VN bez nutnosti regulačních zásahů z vyšší napětíové hladiny.

Z vyhodnocení měřených hodnot napětí vyplývá, že požadavky normy ČSN EN 50160 byly splněny ve všech hodnocených vzorcích dat. Výsledky prokázaly zlepšenou stabilitu a menší rozdíly výsledných napětí. Ze statistických charakteristik vyplývá trend zlepšení parametrů dosažených napětí při funkční regulaci ASRU směrem k žádané hodnotě napětí.

ASRU průběžně vyrovnává bilanci jalového výkonu a svojí regulační činností zcela nebo částečně eliminuje napětíové změny, které jsou generovány přímo vlivem činného výkonu generátoru, případně jako projev změn odběrů na VN lince, nebo při změně provozního stavu sítě.

Pomocí řízení jalového výkonu lze účinně a adekvátně řešit regulaci napětí a v důsledku i snížení energetických ztrát. Jalový výkon mohou kromě VTE dodávat i další typy obnovitelných zdrojů energie jako jsou fotovoltaické solární panely se střídači a samozřejmě synchronní generátory v kogeneračních jednotkách. Pro jakýkoli typ obnovitelných zdrojů energie lze najít použití a metodiku pro jejich využití v soustavě za účelem podpory kvality napětí a stability energetické soustavy.

Historicky byl definován požadavek na kompenzaci odběrů za účelem snížení přenosu jalového výkonu distribuční soustavou. Kompenzovaná síť mohla přenést větší podíl činného výkonu. Omezením přenosu jalového výkonu se snížily i ztráty. Současná doba přináší kabelizaci nových lokalit s přebytkem jalového výkonu, změnu charakteru odběrů – např. spínané zdroje s filtry ve vstupních obvodech projevující se trvalou dodávkou Q a decentralizací výroby elektrické energie s požadavkem na regulaci Q.

Bude zajímavé sledovat do jaké míry regulace napětí a s ní spojené toky jalového výkonu v síti vyřeší úlohy spojené se stabilizací napětí. Projeví se fluktuující toky jalového výkonu na zvýšených ztrátách v síti? Stanou se rychlé změny jalového výkonu obávanou příčinou zvýšeného množství poruch? V současné době již začíná řešit ČEPS s PDS problém přetoků jalového výkonu do přenosové soustavy. V tomto směru vidím pokračování vědecké práce v uvedené problematice regulace U a Q.

#### **14.1. Rekapitulace cílů disertační práce**

- Shrnutí koncepce a principu regulace napětí – splněno v odstavcích 4, 5 a 6
- Měření vlivu instalace ASRU na VTE Kopřivná – splněno v ukázce z tabulky měření v obrazové příloze obr. 19
- Měření vlivu instalace ASRU na KGJ Moravský Beroun – splněno v ukázce z tabulky měření v obrazové příloze obr. 19
- Vyhodnocení měření bez regulace jalového výkonu v režimu  $\cos \varphi = \text{konstanta}$   
Splněno v odstavci 9.1 - VTE Kopřivná a v odstavci 11.1 - KGJ Moravský Beroun
- Vyhodnocení měření s regulací jalového výkonu v režimu  $Q = f(U)$   
Splněno v odstavci 9.2. - VTE Kopřivná a v odstavci 11.2 - KGJ Moravský Beroun
- Exploratorní analýza naměřených dat provozu VTE Kopřivná v provozních režimech  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  a  $Q = f(U)$  – splněno v odstavci 9.3.1, 9.3.2, 9.3.3
- Statistická analýza naměřených dat provozu KGJ Moravský Beroun Kopřivná v provozních režimech  $\cos \varphi = \text{konstanta}$  a  $Q = f(U)$  – splněno v odstavci 11.3.1., 11.3.2., 11.3.3.
- Vyhodnocení instalace systému ASRU a přínos regulace jalového výkonu za účelem zvýšení stability napětí v soustavě – splněno v odstavci 12
- Doporučení pro metodiku návrhu a podmínek pro instalaci ASRU v sítích PDS – splněno v odstavci 13

## Literatura

- [1] Česko. *Zákon č. 458/2000 Sb. ze dne 28. listopadu 2000 o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)*. In: Sbírka zákonů České republiky. 2000, částka 131, s. 4470-4548. Dostupné z [www: <\[https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=458/2000&typeLaw=zakon&what=Cislo\\\_zakona\\\_smlouvy\]\(http://www.aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=458/2000&typeLaw=zakon&what=Cislo\_zakona\_smlouvy\)>](http://www.aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=458/2000&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy). ISSN 1211-1244, v aktuálním znění
- [2] ČESKO. *Zákon č. 180/2005 Sb ze dne 31.3.2005 o podpoře výroby z obnovitelných zdrojů energie*. In: Sbírka zákonů České republiky. 2000, částka 66, s. 3726-3732. Dostupné z [www: <\[https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=180&r=2005\]\(http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=180&r=2005\)>](http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=180&r=2005), ISSN 1211-1244, v aktuálním znění
- [3] *Příloha č.4 PPDS, Pravidla provozování pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy*, ČEZ Distribuce duben 2019, [online], [cit. 2018-05-10], Dostupné z [www: <\[https://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2019.html\]\(http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2019.html\)>](http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2019.html)
- [4] *Code for Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators*, ENTSO-E Network, 8 March 2013,[online], [cit. 2015-05-14], Dostupné z [www: <\[\\[online\\]\]\(http://www.entsoe.eu\), \[cit. 2017-05-06\], Dostupné z www:>](http://www.entsoe.eu)
- [5] *Nariadení komise (EU) 2016/631, ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě*. ERU 2016, [online], [cit. 2018-05-10], Dostupné z [www: <<http://www.eru.cz/-/narizeni-komise-eu-2016-631-kterym-se-stanovi-kodex-site-pro-pozadavky-na-pripojzeni-vyroben-k-elektrizacni-soustave?inheritRedirect=true>>](http://www.eru.cz/-/narizeni-komise-eu-2016-631-kterym-se-stanovi-kodex-site-pro-pozadavky-na-pripojzeni-vyroben-k-elektrizacni-soustave?inheritRedirect=true)
- [6] ČSN EN 50160, ed.3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2011, 32 s., Třídící znak 33 0122.
- [7] *Příloha č.3 PPDS, Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*, ČEZ Distribuce duben 2019, [online], [cit. 2018-05-10], Dostupné z [www: <\[https://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2019.html\]\(http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2019.html\)>](http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2019.html)
- [8] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/77/ES o podpoře elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů energie na vnitřním trhu s elektřinou*. ERU 2009, [online], [cit. 2018-05-10], Dostupné z [www: <\[https://www.eru.cz/-/smernice-evropskeho-parlamentu-a-rady-2009-28-es\]\(http://www.eru.cz/-/smernice-evropskeho-parlamentu-a-rady-2009-28-es\)>](http://www.eru.cz/-/smernice-evropskeho-parlamentu-a-rady-2009-28-es)
- [9] ČESKO. *Zákon č. 406/2000 Sb ze dne 25.října 2000 o hospodaření energií*. In: Sbírka zákonů České republiky. 2000, částka 115, s. 5314-5319. Dostupné z [www: <\[https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=406&r=2000\]\(http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=406&r=2000\)>](http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=406&r=2000), ISSN 1211-1244, v aktuálním znění
- [10] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů*. MPO 2010, [online], [cit. 2018-05-10], Dostupné z [www: <\[https://www.mpo.cz/dokument79879.html\]\(http://www.mpo.cz/dokument79879.html\)>](http://www.mpo.cz/dokument79879.html)



- [11] ČESKO. *Zákon č. 165/2012 Sb. ze dne 31.ledna 2012 o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*. In: Sbírka zákonů České republiky. 2012, částka 59, s. 2482-2513. Dostupné z www: <<https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=165&r=2012>>, ISSN 1211-1244, v aktuálním znění
- [12] *Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdroj*, MPO 2010, [online], [cit. 2018-05-10], Dostupné z www: <<https://www.mpo.cz/cz/energetika/elektroenergetika/obnovitelne-zdroje/narodni-akcni-plan-pro-obnovitelne-zdroje-energie--169894/>>
- [13] *CLC/FpRTS 50549-1– Requirements for the connection of a generating plant to a distribution system - Part 1 :Connection to the LV distribution system* (CENELEC), Brussels: European Committee for Electrotechnical Standadization, February 2015, 45 p., ICS Code 29.160.20
- [14] *CLC/FpRTS 50549-2– Requirements for the connection of a generating plant to a distribution system - Part 2 :Connection to the MV distribution system* (CENELEC), Brussels: European Committee for Electrotechnical Standadization, January 2015, 59 p., ICS Code 29.160.20
- [15] Česko. *Vyhláška č.16/2016 Sb. ze dne 13.ledna. 2016 o podmínkách připojení k elektrizační soustavě*. In: Sbírka zákonů České republiky. 2016, částka 7, s. 122-144. Dostupné z www: <<https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=16&r=2016>>, ISSN 1211-1244, v aktuálním znění
- [16] *PNE 33 3430-8-2 – Požadavky pro připojení generátorů do distribučních sítí – Část 8-2: Síť vn*, Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, zpracovatel EGC-EnergoConsult, s.r.o. Č. Budějovice, leden 2015, 55 s.
- [17] Česko. *Vyhláška MPO č. 79/2010 Sb. ze dne 18.3.2010 o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení*. In: Sbírka zákonů České republiky. 2010, částka 28, s. 918-945. Dostupné z www:<<https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=79&r=2010>>, ISSN 1211-1244, v aktuálním znění
- [18] HABRYCH, R., *Automatická sekundární regulace napětí*, Energetika 5/2015, vydal ČSZE 2015, s. 264-271, ISSN 0375-8842, [online], [cit. 2015-05-14], Dostupné z www: <[http://www.orgrez.cz/fileadmin/user\\_upload/750/E\\_5\\_2015\\_habrych.pdf](http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_5_2015_habrych.pdf)>
- [19] HABRYCH, R., *Řízení jalového výkonu synchronního generátoru*, Energetika 3/2015, vydal ČSZE 2015, s. 146-152, ISSN 0375-8842, [online], [cit. 2015-05-14], Dostupné z www: <[http://www.orgrez.cz/fileadmin/user\\_upload/750/E\\_3\\_2015\\_habrych.pdf](http://www.orgrez.cz/fileadmin/user_upload/750/E_3_2015_habrych.pdf)>
- [20] HEŘMAN, J., A KOLEKTIV, *Příručka silnoproudé elektrotechniky*, 2.vydání, Praha SNTL, 1986, 1028 s.
- [21] MÁŠLO, K. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013, 272 s. ISBN 978-80-260-4461-1
- [22] BRIŠ, R., LITSCHMANNOVÁ, M., *Statistika I. pro kombinované a distanční studium*, vydalo VŠB – TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ostrava 2004

- [23] LITSCHMANNOVÁ, M., *Úvod do statistiky*, vydalo VŠB – TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ostrava 2011, 331 s. [online], [cit. 2012-03-10], Dostupné z www: <[http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/uvod\\_do\\_statistiky.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/uvod_do_statistiky.pdf)>
- [24] DODGE, M., DOUGLAS, C.S., *Mistrovství v Microsoft Excel 2010*, vydalo Computer Poress, Brno, 2011, 936 s., ISBN 978-80-251-3354-5
- [25] CENKA, M., *Obnovitelné zdroje energie*, 2.vydání, vydalo FCC PUBLIC, 2001, 208 s., ISBN 80-901985-8-9
- [26] JENKINS, D., *Renewable energy systems*, London, First edition, 2013, 264 p., ISBN 978-1-84971-369-6
- [27] FRERIS, L., INFELD D., *Renewable energy systems in power systems*, First edition, Chichester, 2008, 284 p., ISBN 978-0-470-01749-4
- [28] ENERCON Wind Energy Converters, Grid Performance - Data Sheet, E-82 E2 / 2300 kW / FT, [online], [cit. 2017-05-06], Dostupné z www: <[https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/broschueren/pdf/en/ENERCON\\_Produkt\\_en\\_06\\_2015.pdf](https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/broschueren/pdf/en/ENERCON_Produkt_en_06_2015.pdf)>
- [29] Elvac – Modulární RTU7, [online], [cit. 2018-05-06], Dostupné z www: <<https://www.rtu.cz/domu/produkty/modularni-rtu>>
- [30] KRBEK, J., POLESNÝ, B., *Kogenerační jednotky - Zřizování a provoz*, 1.vydání, GAS s.r.o. Praha, 2007, 201 s., ISBN 978-80-7328-151-9
- [31] Tedom Quanto D1200, [online], [cit. 2018-10-28], Dostupné z www: <<https://www.tedom.com/cs/kogeneracni-jednotky/quanto/>>
- [32] Tedom Quanto D1200, zemní plyn, kontejner – Technická specifikace, Parametrický list, [online], [cit. 2018-10-28], Dostupné z www: <<https://www.tedom.com/cs/kogeneracni-jednotky/quanto/>>

### Publikační činnost

- [33] ŠPERLÍN, I., GURECKÝ J.: *Poskytování sítí pro malé zdroje*, Proceedings of the 2011 12th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), ISBN 978-80-248-2393-5.
- [34] ŠPERLÍN, I., GURECKÝ J.: *Analýza dat naměřených hodnot zdroje při měření kvality napětí v distribuční soustavě*, Proceedings of the 2013 14th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), ISBN 978-80-248-2988-3.
- [35] BROZOVA S, SPERLIN I, DRAPALA J.: *Control of Voltage and Reactive Power of Dispersion Sources in HV Network*. Hutnické listy, č.6, 2014, roč. LXVII, s. 78-83. ISSN – 0018-8069
- [36] BROZOVA S., PUSTEJOVSKA P., KONSTANCIAK A., SPERLIN I., :*Kontrola napięcia i mocy biernej w niestabilnych źródłach wytwarzania pracujących w sieciach wysokiego napięcia*. Rynek energii 114 (5), 2014 pp. 78-82. ISSN 1425-5960.
- [37] ŠPERLÍN, I., GURECKÝ J.: *Network Support Using Reactive Power of Dispersion Sources in HV Network*. Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Published: May 20, 2015, Ostrava, Czech Republic. Page: 527-531. ISBN 978-1-4673-6787-5.
- [38] ŠPERLÍN, I., GURECKÝ J.: *Advanced functions of network support based on ENTSO-E NC RFG in the Czech technical standards*. Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Published: May 16, 2016, Prague, Czech Republic. Page: 118-123. ISBN 978-1-5090-0907-7.
- [39] ŠPERLÍN, I., GURECKÝ J.: *Regulation Of The Reactive Power Of A WEC Using The ASRU Application On MV Level*. Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Published: May 16, 2017, Ostrava, Czech Republic. ISBN 978-1-5090-6405-2

## Obrazová příloha

Výběrový soubor měření VTE

Datum	Cas	U	P	Q
23.10.2015	0:01:00	22,693	0,33	-0,642
23.10.2015	0:02:00	22,732	0,167	-0,39
23.10.2015	0:03:00	22,704	0,198	-0,479
23.10.2015	0:04:00	22,696	0,242	-0,561
23.10.2015	0:05:00	22,733	0,152	-0,358
23.10.2015	0:06:00	22,691	0,414	-0,616
23.10.2015	0:07:00	22,741	0,115	-0,236
23.10.2015	0:08:00	22,699	0,206	-0,503
23.10.2015	0:09:00	22,672	0,412	-0,691
23.10.2015	0:10:00	22,708	0,261	-0,526
23.10.2015	0:11:00	22,738	0,049	-0,086
23.10.2015	0:12:00	22,732	0,105	-0,225
23.10.2015	0:13:00	22,718	0,736	-0,653
23.10.2015	0:14:00	22,681	0,346	-0,607
23.10.2015	0:15:00	22,696	0,172	-0,39
23.10.2015	0:16:00	22,707	0,201	-0,502
23.10.2015	0:17:00	22,776	0,111	-0,209
23.10.2015	0:18:00	22,679	0,341	-0,718
23.10.2015	0:19:00	22,714	0,192	-0,448
23.10.2015	0:20:00	22,699	0,462	-0,618
23.10.2015	0:21:00	22,692	0,289	-0,628
23.10.2015	0:22:00	22,724	0,553	-0,599
23.10.2015	0:23:00	22,703	0,332	-0,551
23.10.2015	0:24:00	22,727	0,173	-0,418
23.10.2015	0:25:00	22,696	0,181	-0,441
23.10.2015	0:26:00	22,625	0,269	-0,741
23.10.2015	0:27:00	22,662	0,264	-0,551
23.10.2015	0:28:00	22,73	0,049	-0,052
23.10.2015	0:29:00	22,682	0,154	-0,377
23.10.2015	0:30:00	22,671	0,181	-0,441
23.10.2015	0:31:00	22,732	0,08	-0,173
23.10.2015	0:32:00	22,722	0,03	-0,04
23.10.2015	0:33:00	22,715	0,053	-0,099
23.10.2015	0:34:00	22,762	0	0
23.10.2015	0:35:00	22,765	0	0,001
23.10.2015	0:36:00	22,642	0,259	-0,614
23.10.2015	0:37:00	22,683	0,15	-0,273
23.10.2015	0:38:00	22,708	0,039	-0,041
23.10.2015	0:39:00	22,64	0,235	-0,558
23.10.2015	0:40:00	22,67	0,189	-0,427
23.10.2015	0:41:00	22,642	0,219	-0,514
23.10.2015	0:42:00	22,672	0,544	-0,545
23.10.2015	0:43:00	22,646	0,291	-0,545
23.10.2015	0:44:00	22,671	0,575	-0,587
23.10.2015	0:45:00	22,695	0,757	-0,566
23.10.2015	0:46:00	22,712	0,879	-0,56

Výběrový soubor měření KGJ

Datum	Cas	Us	P	Q
16.10.2018	8:05:00	22,374	0,988	0,158
16.10.2018	8:06:00	22,374	0,988	0,154
16.10.2018	8:07:00	22,374	0,985	0,154
16.10.2018	8:08:00	22,388	0,99	0,154
16.10.2018	8:09:00	22,426	0,986	0,157
16.10.2018	8:10:00	22,378	0,986	0,153
16.10.2018	8:11:00	22,378	0,99	0,152
16.10.2018	8:12:00	22,422	0,989	0,156
16.10.2018	8:13:00	22,422	0,989	0,153
16.10.2018	8:14:00	22,378	0,989	0,151
16.10.2018	8:15:00	22,426	0,985	0,153
16.10.2018	8:16:00	22,426	0,99	0,157
16.10.2018	8:17:00	22,407	0,986	0,149
16.10.2018	8:18:00	22,407	0,987	0,154
16.10.2018	8:19:00	22,433	0,987	0,154
16.10.2018	8:20:00	22,405	0,987	0,154
16.10.2018	8:21:00	22,407	0,988	0,157
16.10.2018	8:22:00	22,407	0,988	0,154
16.10.2018	8:23:00	22,407	0,989	0,159
16.10.2018	8:24:00	22,407	0,989	0,155
16.10.2018	8:25:00	22,407	0,984	0,214
16.10.2018	8:26:00	22,376	0,991	0,157
16.10.2018	8:27:00	22,367	0,987	0,153
16.10.2018	8:28:00	22,367	0,987	0,153
16.10.2018	8:29:00	22,331	0,987	0,161
16.10.2018	8:30:00	22,331	0,987	0,155
16.10.2018	8:31:00	22,331	0,987	0,155
16.10.2018	8:32:00	22,331	0,987	0,155
16.10.2018	8:33:00	22,331	0,987	0,155
16.10.2018	8:34:00	22,331	0,987	0,155
16.10.2018	8:35:00	22,331	0,987	0,155
16.10.2018	8:36:00	22,34	0,987	0,151
16.10.2018	8:37:00	22,34	0,987	0,155
16.10.2018	8:38:00	22,34	0,987	0,155
16.10.2018	8:39:00	22,34	0,987	0,155
16.10.2018	8:40:00	22,34	0,987	0,155
16.10.2018	8:41:00	22,39	0,987	0,152
16.10.2018	8:42:00	22,339	0,987	0,152
16.10.2018	8:43:00	22,369	0,987	0,155
16.10.2018	8:44:00	22,369	0,987	0,155
16.10.2018	8:45:00	22,329	0,987	0,155
16.10.2018	8:46:00	22,351	0,984	0,155
16.10.2018	8:47:00	22,315	0,987	0,148

Obr. 19 Ukázka výběrového souboru měření